

ISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 2 (11)

Херсон  
2014

**Науковий вісник Херсонської державної морської академії** : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2014. – № 2 (11). – 272 с.

**Засновник і видавець** – Херсонська державна морська академія

*Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 4 від 03.12.2014 р.)*

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

ХОДАКОВСЬКИЙ Володимир Федорович, к.і.н., професор, головний редактор;

БАРДАЧОВ Юрій Миколайович, д.т.н., професор, заступник головного редактора;

КУЛІКОВА Лілія Борисівна, д.пед.н., професор, заступник головного редактора;

БЕНЬ Андрій Павлович, к.т.н., доцент, заступник головного редактора

**Члени редакційної колегії:**

БУКЕТОВ Андрій Вікторович, д.т.н., професор;

ГОЛОБОРОДЬКО Євдокія Петрівна, д.пед.н., професор;

ЄВТУХ Микола Борисович, д.пед.н., професор;

ІСАЄВ Євген Олексійович, д.т.н., професор;

ЛЄОНОВ Валерій Євгенович, д.т.н., професор;

МАЛИГІН Борис Вадимович, д.т.н., професор;

СОКОЛОВА Надія Андріївна, д.т.н., професор;

СЕЛІВАНОВ Станіслав Євгенович, д.т.н., професор;

ХОДАКОВ Віктор Єгорович, д.т.н., професор

**Адреса редакційної колегії:**

73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20, тел. (0552) 22-35-69

**Свідоцтво про державну реєстрацію** друкованого засобу масової інформації КВ № 18987-7776ПР від 11.05.2012 р.

**Журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України** (постанова президії ВАК України № 1-05/3 від 30.03.2011 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова» і представлений у **Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського**.

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази «**Наукова електронна бібліотека E-Library.Ru**» (Російського індексу наукового цитування – РІНЦ) (договір № 732-11/2014 від 24.11.2014 р.).

**ISSN 2313-4763**

© Науковий вісник Херсонської  
державної морської академії, 2014

*МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ*

## СМЫСЛОВОЕ ПОЛЕ ЗАДАЧ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ

*Вильский Г.Б.*

*Международный технологический университет «Николаевская политехника»,  
г. Николаев*

*Аннотация.* Рассматриваются научные и технические реализационные меры для существенной модернизации действующих или разработки специальных СУДС. Приведена систематизация смыслового поля постановок задач с указанием путей их решения для повышения эффективности работы систем управления движением судов. Предложена технология, включающая выбор метода моделирования информационной безопасности судна и формирования базы вероятностных моделей рисков на водном пути.

*Ключевые слова:* судно, судоходство, управление, поле, информация, задача, безопасность, риск, модель, вероятность.

**Постановка проблемы, актуальность, связь с государственными программами.** Научные разработки по системам управления движением судов (СУДС) направляются на достижение нового качества в гарантиях безопасного мореплавания. Для проведения исследований широко используются системный, структурный, функциональный, обзорно-наблюдательный подходы и их различное сочетание. Вместе с этим недостаточное внимание уделяется решению задач, смысловое поле которых отражает повышение эффективности работы существующих систем управления движением морских судов. К таким главным задачам относятся поиск и выполнение решений, обеспечивающих развитие гарантий безопасного управления судном и ликвидацию параметрической дезориентации менеджмента на командном мостике, которые обусловлены отсутствием безукоризненности и защищённости потоков данных в передаваемых на водные пути сведениях и сообщениях [1]. Постановка задач на модернизацию и эффективное функционирование СУДС остаётся актуальной проблемой, и в связи с созданием систем информационной безопасности судна (ИБС). Отсутствие комплексной постановки научно обоснованных задач на исследования и разработку услуг по управлению потоками судов отражается на управлении судоходством в целом, а недостаточность информационного наполнения, контролируемого СУДС, сдерживает снижение аварийности в стеснённых условиях плавания. Быстрое, конструктивное и эффективное начало решения проблемы видится в формировании задач работы СУДС с использованием компьютерной инженерии и алгоритмических методов оценки опасностей на маршруте судна. Постановка проблемы и актуальность смыслового поля задач СУДС для судовождения исходят из действительности морской безопасности, морской доктрины Украины, а их острота подтверждается пунктом 7 («Развитие навигационных систем разного назначения») раздела «Освоение новых технологий высокотехнологического развития транспортной системы...» постановления КМУ от 12 марта 2012г. № 294 «Некоторые вопросы определения среднесрочных приоритетных направлений инновационной деятельности общегосударственного уровня на 2012–2016 годы».

**Анализ публикаций и постановка задачи исследования.** Задачам построения и функционирования систем безопасного управления движением судов посвящены научные исследования известных отечественных учёных: В. М. Кошевого, А. И. Кравченко, А. С. Мальцева, ряда зарубежных учёных и морских специалистов. Современные технологии, которые решают задачи, повышающие эффективность работы существующих систем управления движением морских судов, показаны в работе [2]. Предлагаемые новые задания на разработку технологий управления характеризуют «Информационный портрет состояния судна», «Нечеткое управление судном», «Цикл выработки решения по управлению судном» на основании имеющейся неполной информации, что расширяет возможности по выработке командных решений, способствует предупреждению

столкновений судов и аварийности, и устанавливает устойчивый алгоритм судоводительских процедур. В ряде работ считается, что анализ безопасности следует проводить по структурно-логическим моделям. Использование таких моделей позволяет получать только качественную оценочную составляющую риска аварий и связанных с ней угроз, и не позволяет характеризовать достаточность принятых мер по локализации и ликвидации последствий аварии. Задача анализа моделей противодействия угрозам нарушения информационной безопасности, базируется на выборе рационального варианта реагирования, освещена в работе [3]. Новизна предложенного исследования заключается в принятии решения на множестве альтернатив средств и методов информационной безопасности в зависимости от определения уровня его эффективности. В системе информационной безопасности судна её восстановление или состояние дрейфа выполняется путём оценок привлекательности угроз и определением их опасности. Описанные постановки задач с системами оценок и моделями конкретных угроз на пути движения не отвечают известным принципам [4] формирования нового качественного состава задач, решение которых повышает эффективность работы СУДС. Анализ публикаций показывает необходимость переосмысления задач, решаемых СУДС, и проведения их систематизации.

**Целью работы** является систематизация смыслового поля постановок задач с указанием путей их решения для повышения эффективности работы систем управления движением судов.

**Основные результаты работы.** Исследования работы СУДС проводились в украинском северо-западном регионе Чёрного моря. Функционирование систем, по данным натурного и экспертного обследования, характеризуется усложненными условиями судоходства, которые проявляются в виде большой интенсивности движения судов, ограниченных переменных глубин и недостаточности естественных ориентиров для радиолокационных наблюдений. Здесь проходят пути крупнотоннажных судов, газозовов и химозовов, с грузами повышенной опасности. Морские районы этого региона относятся к особым зонам уязвимости окружающей среды. Исходя из отмеченных особенностей плавания, показателей и установленных результатов расследования аварийности, к береговым системам управления и регулирования движения судов выставляется решение таких задач:

- освещение ближней надводной обстановки на региональных центрах управления движением с выдачей необходимых данных по объектам в другие системы;
- своевременное обнаружение и распознавание выявленных надводных объектов, включая малоразмерные;
- слежение за положением и действиями выявленных надводных объектов;
- контроль положения судов на якорных стоянках;
- управление движением судов в зонах раздельного движения, на подходах к базам и портам, в узкостях и на каналах в сложных гидрометеоусловиях;
- выдача данных надводной обстановки в службы капитанов портов, лоцманские службы;
- доступ к информационным ресурсам системы центральных органов исполнительной власти;
- информационный обмен необходимой информацией между странами Черноморского региона.

Отличительные признаки обрабатываемых в автоматизированных СУДС задач состоят в том, что динамика функционального управления преимущественно зависит от окончательных решений принимаемых лоцманом-оператором, точность которых вырабатывается методом проб и ошибок. По этой причине в литературных источниках по судовождению и системам управления движением судов содержится хронология приобретения личного производственного опыта по управлению движением морских судов в виде содержательных словесных моделей. В них не приводится

систематизированная концепция процесса управления, а преобладает словесное описание алгоритма действий при решении стратегических и тактических задач по безопасному движению судном без формализации действий управления и четкой методики решения технологических задач.

Для решения комплекса задач обеспечивающих гарантированную информационную безопасность судна необходимо сравнение СУДС с новой системой гарантированной информационной безопасности управления движением судов (СГИБУДС) по классификационным признакам, способам управления и структуре элементов.

Обе системы материальные, неорганической природы и информационно-контентные. Основным отличием СГИБУДС является тот факт, что в ней присутствует навигационно-информационное поле с параметрами вероятностного прогноза экспозиции водного пути и знание того, как обеспечить гарантированную безопасность плавания. Раскроем сущность классификационных признаков систем управления движением судов.

*По признаку общности и различия:* СУДС обладает только прямой связью по каналу определения местоположения, а обратные связи наблюдаются только во внутреннем контуре регулирования курса; СГИБУДС имеет как прямую, так и обратную связи между объектом управления, средством управления и элементами, которые формируют заданный алгоритм функционирования системы управления, определяют динамические характеристики объекта, параметры внешних воздействий, анализируют навигационную обстановку и вырабатывают данные для изменения заданного алгоритма управления движением.

*По признаку управления:* СУДС (ручного управления) не детерминируется, требует вмешательства лоцмана-оператора для корректировки состояния, а СГИБУДС детерминирована (после предложенных технических решений информационно-аналитического характера).

*По взаимосвязи элементов:* обе системы являются динамическими с эволюцией во времени параметров состояния элементов и их свойств. Эти особенности системы учитывались при математическом моделировании процессов подготовки данных о маневренных свойствах, разработке заданного функционирования системы и в процессе управления маневрированием.

*По признаку сложности реализуемых функций:* СУДС относится к простейшим (1-го уровня) из-за отсутствия многообразия внешних и обратных связей, а СГИБУДС следует отнести к системам 4-го уровня, способных запоминать, хранить, обрабатывать и преобразовывать информацию для приспособления системы к изменяющимся условиям, факторам угроз и рисков.

По этой причине в аналитических блоках новой системы по заданному алгоритму формируется и должна храниться, запоминаться и обрабатываться информация о маневренных свойствах для текущего состояния судна, о параметрах внешних воздействий, о текущем месте, и другая, которая удовлетворяет существующую навигационную обстановку. Организация управления курсом производится по внутреннему контуру и одинакова в обеих системах.

*По управляемости* средства управления должны удовлетворять принципы достаточного информационного многообразия, целенаправленности управления и быстрого действия устройства создания заданного алгоритма и решения задачи расхождения. Ограничительной характеристикой быстрого действия системы является инерционность отработки команд и достижения средствами управления заданных параметров, а также инерционность судна как объекта управления.

*По организации системы:* СУДС одноцелевая, а СГИБУДС – многоцелевая. Она соответствует *принципу целостности* по признакам наличия объекта и средства управления, прямой и обратной связей. СУДС такими качествами обладает не в полной мере.

По принципу простоти СУДС имеет меньшее число элементов и связей. Однако в отличие от СГИБУДС она не всегда достигает цели управления.

По принципу сбалансированности СУДС не предусматривает функционирования при изменении заданного алгоритма и не позволяет изменять закон управления в зависимости от состава элементов. В то же время СГИБУДС предусматривает введение законов управления по точности, быстродействию и минимизации времени и пути при маневрировании.

По принципу преимущественных возможностей предусматривается, что СГИБУДС будет обладать несомненными преимуществами благодаря возможности учета маневренных характеристик, внешних воздействий и адаптации заданного алгоритма управления при изменении навигационных условий плавания. СУДС составляет основу СГИБУДС.

Реализация задачи каждой новой функции СУДС включает выбор метода моделирования информационной безопасности судна. При этом предполагается, что всё информационно-навигационное поле условно разделяется на статическую и динамическую составляющие, а доля ресурсного контента поля представляется уравнением:

$$m(t) = 1 - ae^{-T},$$

где  $m(t)$  – доля используемого контента в общем объёме навигационного поля за время  $T$ ; первое вычитаемое относится к статическому информационному ресурсу; второе вычитаемое относится к динамическому навигационному ресурсу.

С точки зрения интеграции информационных потоков, их составляющие сильно различаются. Статическая составляющая содержит параметры средств навигационного оснащения, а динамическая – постоянно обновляемые навигационные ресурсы в виде сообщений, сведений и предписаний. В динамической составляющей наиболее выражена характеристика гидрометеорологического контента. Ему присущ уровень данных с повышенной ответственностью, обновляемостью, генерацией и распространением.

Использование аналитических выражений характеристик информационных потоков с сообщениями и сведениями на пути следования судна, ранжирование контентного ресурса судовых и береговых СУДС позволяет просчитывать гарантию безопасного движения, а это имеет огромную ценность для практики мореплавания. В принятии решения управления судном основное значение принадлежит задаче с оценкой актуальности информации. Степень актуальности данных неодинакова для разных видов сообщений и их тематики. При этом скорость старения данных с параметрами обстановки изменяется в разной степени и имеет многофакторную зависимость, главной из которых считается актуальность тематического содержания. Предмет данной составляющей может быть количественно оценён флуктуацией информационного потока. При управлении судном по предварительно подготовленному плану движения, циркулирующие судовые данные категорируются по тематической направленности. Процесс их актуализации представляется экспоненциальной моделью. В этом случае формализация потоков контента  $N$  представляется экспоненциальной зависимостью в виде:

$$N(t) = N(t_0)e^{\lambda(t-t_0)},$$

где  $\lambda$  – среднее относительное изменение интенсивности потока данных;  $(t-t_0)$  – промежуток времени существования потока.

Задача с решением информационной содержательности для каждого временного интервала  $T$  описывается равенством:

$$\int_0^T \sum_{i=1}^M n_i(t) dt = NT,$$

где  $n_i(t)$  – количество сообщений в единицу времени;  $M$  – общее количество всей возможной тематики сообщений.

Основной смысл такой формализации заключается в возможности изучения динамики отдельных морских сообщений с плотностью  $n_i(t)$ . Теоретическое представление задачи говорит, что множество данных о навигационных параметрах на маршруте ассоциировано с определенным содержательным набором и может быть одновременно отнесено к нескольким различным тематическим категориям.

В ряде случаев, например, когда одновременно существует несколько источников, производящих контентные данные для судовождения, применяется логистическая модель информационных потоков, в которой каждый поток считается в среднем постоянным по количеству знаков и сообщений. При этом исходят из того, что формирующие и обеспечивающие циркуляцию источники информации работают в стационарном или повторно-кратковременном режиме и создают максимальную емкость информационного пространства. Во времени изменяются лишь объемы сообщений с соответствующим содержанием. Как правило, рост количества данных одной направленности сопровождается уменьшением сообщений другой.

В составе одной из задач исследования информационных потоков СУДС анализ массивов данных дискретных сигналов проводится по частотно-семантическим рангам ключевых слов, фраз или отдельных сообщений. Эта модель наполнена аналогами дискретных сигналов ранговых фраз из морских сообщений или отдельных сведений. Каждому сообщению приписывается вес равный усредненной частоте его появления во всем информационном потоке входящих в него значимых ключевых слов.

Перспективной задачей в исследованиях по обеспечению СУДС безопасности мореплавания представляется проведение фрактального моделирования, позволяющего увидеть закономерности формирования и циркуляцию морских сообщений, представить информационное пространство судовождения в виде самоподобия с развивающейся структурой стохастических фракталов. Такое представление навигационно-информационного контента справедливо на уровне математических ожиданий. Понимая, что в информационном пространстве судовождения возникают, формируются, растут и размножаются группы (кластеры) взаимосвязанных данных с необходимыми параметрами для управления судном, их моделирование ведётся с целью установления фрактальных характеристик с использованием показателя Херста, характеризующего случайное поведение временного ряда сообщений. Чем ближе его значение к единице, тем содержание данных навигационного поля персистентнее, наиболее детерминировано. Построенные с решением рекомендованных задач на основе теории кластерного анализа судовые и береговые СУДС способны самостоятельно выявлять новые признаки морских подвижных объектов и проводить их распределение по видам и категориям.

При разработке задач с исследованием содержательности и направленности данных от источников морской информации устанавливаются отклонения в сообщениях и сведениях, не отвечающие оперативности судовождения. Когда их количество относительно невелико, источник генерации извещений считается стабильным. В противном случае для вычисления уровня нестабильности источников информации в СУДС используется формула, построенная на принципах линейной метрики:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{M + \max(r_i)} \sum_{j=1}^M \left| r_{ij} - \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M r_{ik} \right|,$$

где  $N$  – количество извещений;  $M$  – количество дней;  $\max(r_i)$  – максимальное суточное количество вхождений извещений  $i$  от источника за все время  $t$ ;  $r_{ij}$  – количество пришедших извещений  $i$  за день  $j$ .

По мере развития и модернизации СУДС меняются задачи по порядку формирования и циркуляции потоков данных для управления судном, совершенствуются диагностика морских сообщений и телекоммуникационный анализ. Такие изменения выражаются в появлении новых (или ликвидации существующих) подходов в формировании данных о параметрах навигационной обстановки, изменении масштабов и маршрутов их представления и движения. В этих условиях морские сообщения на

водных путях, как элемент ИПС и безопасности мореплавания, могут быть представлены графической и матричной моделью. Результаты исследования говорят о выгоды моделирования, с научной и судоводительской точек зрения, обрабатываемых в СУДС данных графическим и матричным методами. В этом контексте все циркулирующие на водном пути сообщения разделяют на три группы – рекомендательные, управляющие и ситуационные. Решение задач совершенствования подготовки и применения информационных потоков ведется в направлении оценки непрерывности и оперативности исполнения сообщений для управления судами. Во время анализа судовых сообщений вычисляют коэффициент непрерывности, как отношение нормативной длительности действия сообщения к фактической длительности действия сообщения, и коэффициент оперативности управления судами по исполненным сообщениям, согласно выражению:

$$K_o = \frac{\sum(D_1d_1)K_1 + \sum(D_2d_2)K_2 + \sum(D_3d_3)K_3}{\sum D_1K_1 + \sum D_2K_2 + \sum D_3K_3},$$

где –  $D_1, D_2, D_3$  установленные сроки исполнения для соответствующих сообщений в часах;  $K_1, K_2, K_3$  – отставания от принятых сроков исполнения сообщений в часах;  $d_1, d_2, d_3$  – удельный вес сообщений конкретного вида.

Как было отмечено выше, в мореплавании всё большее значение приобретают вопросы управления информационной безопасностью. На стадии постановки задач находится создание научно обоснованных теоретических положений моделирования информационной безопасности движения судов и водных путей, пригодных для практического применения в судоходстве. СУДС, предоставляя услуги по регулированию движения судов, оснащенные техническими средствами, выполняют такие функции:

- выявление судов на подходах к зоне действия, установление связи с ними, получение и регистрация необходимых данных о каждом судне;
- информационное обеспечение мореплавания с передачей на суда гидрометеорологической информации, сведений об изменениях в работе средств навигационного оснащения, о смещении плавучих СНО со штатных мест и другой навигационно-гидрографической и гидрологической информации в зоне действия, информации о состоянии движения в зоне действия и факторы, которые усложняют плавание. Информация передается на судно по объявленному расписанию, на запрос судна или по инициативе СУДС:
  - организация и контроль путем установления режима за движением судов;
  - предоставление судам рекомендаций, которые касаются очередности движения, времени начала движения, маршрута, скорости и интервалов движения, места якорной стоянки;
  - предупреждение относительно нарушения судами правил плавания в этой зоне;
  - предупреждение судов в случае развития ситуации опасного сближения с другими судами;
  - предоставление рекомендаций относительно избежания опасности столкновения;
  - предупреждение судна в случае отклонения его от безопасного маршрута плавания и возвращение к исходному маршруту;
  - предоставление навигационной помощи (радиолокационное проведение) по запросу капитана судна или самостоятельно СУДС согласно правилам плавания в этой зоне путем: передачи информации о положении судна относительно навигационного ориентира, фарватера, промежуточных пунктов маршрута; о курсе и скорости судна относительно грунта; предоставление рекомендаций судну относительно изменения курса или скорости; передачи информации об идентификационных данных, позициях и намерениях других судов, а также предупреждении этих судов;
  - содействие аварийно-спасательным, буксирным, дноуглубительным и другим специальным работам, которые ведутся в зоне действия системы;

- установление связи между судами, береговыми организациями и службами по вопросам, которые связаны с обеспечением безопасности движения судов;
- сбор, обработка, регистрация и хранение информации о судах;
- взаимодействие с сопредельными СУДС, лоцманскими, буксирными, аварийно-спасательными и другими службами, которые оказывают содействие мореплаванию в зоне действия.

В зависимости от зоны действия, СУДС решают задачи:

- обслуживают портовые суда на акватории порта и на подходах к нему;
- обслуживают региональные (прибрежные) суда в прибрежных водах и узостях или в сопредельных акваториях нескольких морских или речных портов.

В концепцию и архитектуру СГИБУДС включено решение задач по разработке блока базовых моделей, который должен содержать вероятностные модели рисков для судна на водном пути, учитывать и содержать следующие параметры: ветер, осадки, течение, ледовые обстоятельства, температурные условия, объединённые в одну группу под названием «Погодные и метеорологические условия». Сформированная база вероятностных моделей данного блока образует систему информационной безопасности судна и делится на три категории:

### **Категория 1 – Погодные и гидрометеорологические условия**

Подкатегория 1.1 **Ветер** (NUMBER (2));

Подкатегория 1.1.1 **Направление ветра** ( VARCHAR2 (100)).

Подкатегория 1.1.2 **Сила ветра** (NUMBER);

Подкатегория 1.1.3 **Порывистость** (SMALINT);

Подкатегория 1.2 **Течение** (INTEGER);

Подкатегория 1.2.1 **Направление течения** (CHAR (100));

Подкатегория 1.1.2 **Сила течения** (CHAR (100));

Подкатегория 1.1.3 **Наличие подводного течения** (CHAR (100));

Подкатегория 1.3 **Осадки** (INTEGER);

Подкатегория 1.3.1 **Дождь – Видимость** (CHAR (5));

Подкатегория 1.3.2 **Снег – Видимость** (CHAR (5));

Подкатегория 1.3.3 **Туман – Видимость** (CHAR (5)).

Подкатегория 1.4 **Ледовая обстановка** (NUMBER (10));

Подкатегория 1.4.1 **Ледостав – Сплоченность** (CHAR (100));

Подкатегория 1.4.2 **Экстремальное положение кромок–границы льда** (CHAR(100));

Подкатегория 1.4.3 **Разрушенность – Торосистость** (CHAR(100));

Подкатегория 1.4.4 **Очищение ото льда** (CHAR (80));

Подкатегория 1.5 **Температурные условия** (NUMBER (10));

Подкатегория 1.4.1 **Выше ноля** (SMALINT)

Подкатегория 1.4.2 **Ниже ноля** (SMALINT)

### **Категория 2 – Информационные условия**

Подкатегория 2.1 **Актуальность информации**

Подкатегория 2.2 **Объективность информации**

Подкатегория 2.3 **Целостность информации**

Подкатегория 2.4 **Конфиденциальность информации**

Подкатегория 2.5 **Защита информации**

### **Категория 3 – Информационно – вероятностные характеристики угроз**

Подкатегория 3.1 **Информационные предпосылки возникновения угроз**

Подкатегория 3.1.1 **Потеря ориентации в управлении судном**

Подкатегория 3.1.2 **Психофизиологическое состояние оператора**

Подкатегория 3.1.3 **Неверные команды и ошибки оператора**

Подкатегория 3.2 **Информационные угрозы**

Подкатегория 3.2.1 **Посадка на грунт**

Подкатегория 3.2.2 **Навал**

Подкатегория 3.2.3 Столкновение

Подкатегория 3.2.4 Ледовая

Подкатегория 3.2.5 Техногенная

Подкатегория 3.2.6 Враждебные действия

По номерам подкатегорий создается таблица информационных условий, а по результатам программной обработки данных строится график информационной безопасности движения судна. Эффективное решение задач, стоящих перед системой, обеспечивается выполнением информационно-аналитических функций по предупреждению аварийности на основе интеграции расчётных вероятностных данных навигационно-информационного поля, функций освещения реальной надводной обстановки и управления связью с судами.

Наиболее полное представление о возможностях способах решения задач можно получить путем сравнения существующих СУДС и СГИБУДС по классификационным признакам и структуре приведенной в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение задач и характеристик действующих СУДС и СУДС нового поколения

<i>№ n/n</i>	<i>Наименование задач и характеристик</i>	<i>Действующие СУДС</i>	<i>СУДС нового поколения (СГИБУДС)</i>
1	<b>Классификационные признаки</b>		
1.1	Реализация вероятностных функций	Без реализации	С реализацией
1.2	Детерминированность (поведение) Детерминированность	недетерминированная	детерминированная
1.3	Степень автоматизации функций	обычная	повышенная
1.4	Степень сложности	простая	сложная
1.5	Степень определенности	недостаточная	высокая
2	<b>Информационные свойства</b>		
2.1	Точность	Субъективность	Повышенная
2.2	Адекватность	Недостоверность	Достоверность
2.3	Достаточность	Неполнота	Полнота
2.4	Полезность	Неактуальность	Актуальность
2.5	Оперативность	Несвоевременная	Ценность
2.6	Объективность	Неполная ясность	Понятность
2.7	Эмергентность	не обладает	обладает
2.8	Энтропия	не обладает	обладает
2.9	Эластичность	не обладает	обладает
3.	<b>Структура</b>		
3.1	Цели	одноцелевая	многоцелевая
3.2	Целостность	не соответствует	соответствует
3.3	Простота	не соответствует	соответствует
3.4	Сбалансированность	не соответствует	соответствует

Задачи, которые должны реализовать главные положения данной концепции, и которые следует применять в СУДС нового поколения, представляют:

– развитие СУДС на основе интеграции информации, получаемой от береговых РЛС, с информацией, полученной от других источников (АИС, береговые и спутниковые системы связи);

- образование региональных СУДС посредством информационной интеграции и взаимодействия локальных СУДС, обслуживающих отдельные порты или участки судоходных путей;
- образование сети СУДС, охватывающей непрерывной зоной радиолокационного и/или транспондерного контроля движения судов;
- формирование информационного пространства судовождения на локальном, региональном, национальном и международном уровнях;
- обеспечение доступа всех участников транспортного процесса к соответствующему навигационно-информационному полю судоходства.

Результаты выполненных исследований направлены на синтез СУДС, которая обеспечивает технологию гарантированной безопасности информационного обеспечения, как на переходе, так и при выполнении морских операций. Задачи построения систем гарантированной информационной безопасности управления движением судов предусматривают введение новых элементов, функции которых интегрированы на всех уровнях иерархии. На нижнем уровне иерархии работает кибернетическая подсистема обеспечения оперативными, декларативными и стандартными (базовыми) данными о возможных угрозах и рисках судоходству. В СУДС нового поколения (СГИБУДС) на основании полученных данных система контроля состояния положения судна на водном пути определяет начало возникновения опасности, сопровождает её до экстремума и полного исчезновения. Отображение видов опасностей с выработкой визуальных сигналов лоцману-оператору и лоцману на борту судна позволяет своевременно отдавать команды на изменение режима движения и планировать технологические задачи маневрирования и расхождения. Это обеспечивает приспособляемость алгоритма работы системы к новым сложным условиям плавания, гарантирует безопасность судна.

Новые качества СУДС достигаются за счет использования специальных методик, способов и устройств отработки информационной безопасности судовождения. Таким образом, в зависимости от типа судов, их назначения и района плавания структура СГИБУДС должна формироваться соответствующими навигационными устройствами и специализированными блоками, которые позволяют полностью контролировать безопасность движения судна за счёт соответствия новому высокому уровню согласованности действий лоцмана-оператора и команды на мостике. Полученные результаты по систематизации задач исследования информационного обеспечения судоходства требуют от СУДС нового поколения перераспределения функций в системе менеджмента мостика судна: капитан судна-лоцман и лоцман-оператор СУДС.

Таким образом, решение задач, повышающих эффективность работы систем управления движением судов, целесообразно проводить с учётом результатов настоящего исследования, разработанных концептуальных положений по созданию СУДС нового поколения вместе с действующим международным и национальным морским законодательством.

**Выводы и предложения.** В работе проведена систематизация смыслового поля постановок задач с указанием путей их решения для повышения эффективности работы систем управления движением судов. Рассмотрены научные и технические реализационные меры для существенной модернизации существующих или разработки специальных СУДС. Выполнено сравнение классификационных признаков, способов управления и структуры элементов действующих СУДС и СУДС нового поколения. Предложено проводить синтез архитектоники систем с включением метода моделирования информационной безопасности судна и формирования базы вероятностных моделей рисков на водном пути.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисова Л. Ф. Мобильная система управления движением судов / Л. Ф. Борисова // Наука и образование : Материалы Междунар. научно-техн. конф. (Мурманск, 6–14 апреля 2005 г.) : в 7 ч. / Мурман. гос. техн. ун-т. – Мурманск, 2005. – Ч. 7. – С. 81-84.
2. Вагущенко Л. Л. Современные информационные технологии в судовождении [Электронное учебное пособие] / Л. Л. Вагущенко – Одесса : ОНМА, 2013. – 135 с.
3. Дмитров Д. И. Система мониторинга судоходной обстановки Азово-Черноморского региона Украины / Д. И. Дмитров, А. И. Кравченко, И. А. Стыранко // Комп'ютеризовані інформаційно-аналітичні системи моніторингу та управління рухом суден : тези доповідей науково-практичного лекторію : (8–10 січня 2008 р., м. Ялта, Україна) – Миколаїв ; ОНМА ; МПІ, 2008. – С. 4-5.
4. Вильский Г. Б. Развитие функционально-информационного обеспечения СУДС. XIV Научно-техническая конференция [Практичные проблемы развития радио-связи та радіонавігації в ГМЗЛБ, в системах АИС, СУРС і РИС], Одеса, 23–24 жовтня 2013 р. / ОНМА, 2013. – С. 25-26.
5. Кравченко А. И. Общие принципы системного описания и реализации автоматизированных радиотехнических систем информационной поддержки служб регулирования движения судов в прибрежных морских регионах / А. И. Кравченко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 2 ( 50 ). – С. 14-17.

### **Вільський Г.Б. ЗНАЧЕННЯ ПОЛЕ ЗАВДАНЬ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДЕН**

*Розглядаються наукові та технічні реалізаційні заходи для істотної модернізації діючих або розробки спеціальних СУДС. Наведена систематизація смислового поля постановок задач із зазначенням шляхів їх вирішення для підвищення ефективності роботи систем управління рухом суден. Запропоновано технологію, що включає вибір методу моделювання інформаційної безпеки судна та формування бази імовірнісних моделей ризиків на водному шляху.*

**Ключові слова:** судно, судноплавство, управління, поле, інформація, задача, безпека, ризик, модель, ймовірність.

### **Vilsky G.B. SEMANTIC FIELD PROBLEMS VESSEL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEMS**

*The scientific and technical measures for upgrading current special VTS or developing the new ones are considered. The systematization of semantic field production tasks with solutions for them to improve the efficiency of vessel traffic management systems is introduced. The technology, which includes the choice of modelling method of vessel information security, and forms a basis probable risk models on the waterway, is suggested.*

**Keyword:** ship, navigation, control, field, information, challenge, security, the risk, model, the probability.

© Вільський Г.Б.

Статтю прийнято  
до редакції 16.11.14

## ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЭКИПАЖА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИТУАЦИЯХ НА МОРСКОМ СУДНЕ, ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ОТБОР И ПОДГОТОВКА

*Годованюк С.П.*

*Херсонская государственная морская академия*

***Аннотация.** В работе проведен анализ причин аварий на море, раскрыто понятие «человеческий фактор» применительно к безопасности мореплавания. В контексте изложения работы использованы термины «деятельность», «экстремальная, чрезвычайная ситуации», требующие толкования. Показана актуальность работы в раскрытии поведения человека в экстремальных ситуациях в процессе их профессиональной деятельности на морских судах, что определило цель работы в виде проведения эмпирического научного исследования по выяснению причин, обуславливающих возможность успешной деятельности в экстремальных условиях с одной стороны, с другой стороны выяснение многих факторов, мешающих ее осуществлению, и как результат – необходимость проведения профессионального отбора и подготовки членов экипажа. Эмпирические исследования показали, что к причинам, обуславливающим возможность успешной деятельности человека в экстремальных условиях, прежде всего, следует отнести особенности его личности. Показано, что деятельность людей в особых, экстремальных ситуациях требует качественного профессионального отбора, а хорошо подготовленный и натренированный экипаж окажется способным управлять экстремальной ситуацией.*

***Ключевые слова:** деятельность, экстремальная, чрезвычайная ситуация, человеческий фактор, морское судно, профессиональный отбор, подготовка членов экипажа.*

**Введение.** По данным Регистра судоходства Ллойда (лондонское классификационное общество), ежегодно в море гибнет 350–400 судов общим весом судов и грузов 600–800 тыс. тонн, в результате кораблекрушений ежегодно погибает около 200 тыс. человек. Кроме того, еще на 7–8 тыс. судов случаются серьезные аварии, не приводящие к катастрофическим последствиям, и это несмотря на значительное улучшение показателей по безопасности судов.

Последние десятилетия характеризуются быстрым развитием и становлением технических средств обеспечения безопасности мореплавания на основе внедрения новейших средств в области связи, радиоэлектроники и вычислительной техники высокой надежности.

Распространенная сентенция (сентенция по словарю Ожегова – нравоучительное изречение) часто со ссылкой на Международную Морскую Организацию (ИМО), без указания конкретного документа, о том, что 80 % морских аварий вызвано человеческой ошибкой, по высказыванию многих морских экспертов неверна, человеческая ошибка, или неверное решение, это то-же самое, является причиной 100 % аварий либо около того. Однако, очевидно, нужно верить многолетним данным, приводимых регистром Ллойда, Лондонским институтом страховщиков и обществами взаимного страхования о 80 % морских аварий связанных с человеческой ошибкой.

Далее обратим внимание на принятую 23-й сессией Ассамблеи ИМО в 2003 году Резолюцию А.947(23) – Концепция (видение) человеческого элемента, принципы и цели организации, т.е. в ней говорится о человеческом элементе (human element), как о комплексном, многомерном понятии, описывающее предмет, влияющий на безопасность на море и защиту морской окружающей среды.

Человеческий элемент включает весь спектр человеческой деятельности, выполняемой судовыми экипажами; береговыми службами управления; органами власти, признанными организациями, верфями; законодателями и другими вовлеченными сторонами, которые должны взаимодействовать для того, чтобы эффективно действовать в вопросах человеческого элемента.

Секция русских переводов ИМО перевела название Резолюции 947(23) как «Концепция, принципы и цели организации в области человеческого фактора», и в дальнейшем использует термин «человеческий фактор» для перевода.

Заметим, что слова «элемент» и «фактор» имеющие латинские корни, близки по употреблению в русском и английском языках, но, тем не менее, использовать такой перевод в английском тексте не корректно.

Таким образом, в документах, выпускаемых ИМО и в морской технической литературе, употребляются оба слова «человеческий элемент» и «человеческий фактор», но в литературе употребляют «человеческий фактор» (human factor) в единственном числе, в то время как во всех руководящих документах ИМО говорится о «человеческих факторах» (human factors), т.е. во множественном числе. На сегодня используют термины «human element», «human factors» и «human factor».

Однако, в одном из журналов The International Maritime Human Element Bulletin, который выпускает Лондонский институт навигации при поддержке Регистра Ллойда, приводится цитата статьи: «человеческие факторы» или «человеческий фактор» – это термины, которые зачастую неверно используются и применяются в качестве замены «человеческого элемента» или даже «ошибки человека».

В Википедии отмечается, что «человеческий фактор» – это многозначный термин, описывающий возможность принятия человеком ошибочных или алогичных решений в конкретных ситуациях со ссылкой на значение слова «человеческие факторы» в Большой Советской Энциклопедии.

Резолюцией А.884 (21) ИМО в 1999 году было принято «Руководство по расследованию человеческих факторов в авариях и инцидентах на море», где предлагаются процедуры, предусматривающие последовательно-системный подход при расследовании роли человеческих факторов.

Это факторы персонала, судовая организация, условия труда и проживания, судовые факторы, береговое управление, внешние воздействия и среда.

На рис. 1 представлена диаграмма «Человеческий элемент».



Рис. 1 – Диаграмма «Человеческий элемент»

Как видно из диаграммы, на человеческий элемент влияет множество факторов, в число которых входят и человеческие факторы.

Они определены в Резолюции А.884(21) как:

- способности, навыки, знания (следствие подготовки и опыт);
- личностные (ментальное и эмоциональное состояние);
- физическое состояние (состояние здоровья, наркотики и алкоголь, усталость);
- занятость до инцидента/происшествия;
- обязанности во время инцидента/происшествия;
- фактическое поведение во время инцидента/происшествия;
- собственная позиция, отношение.

В. Н. Дулин в кандидатской диссертации [1] приводит пример, как береговая охрана США классифицирует человеческий фактор в авариях: доля управления – 30 %, усталость, невнимательность, небрежность – 22 %, рабочая обстановка, плохое оборудование – 18 %, плохая теоретическая подготовка, недостаточные технические знания – 22 %.

Для членов экипажа на судах проблема «человеческий фактор – как фактор риска» имеет особую значимость, поскольку моряки работают в особых, экстремальных условиях, т.е. для экипажа, находясь на судне и занимаясь профессиональной деятельностью, всегда остается вероятность того, что в море произойдет какая-нибудь неожиданная неприятность – экстремальная ситуация, и экипаж должен быть готов принять меры по ликвидации экстремальной ситуации.

Конечно, на сегодняшний день используют современные средства разрешения экстремальных ситуаций (чрезвычайных ситуаций) на море. Береговые службы наблюдения постоянно прослушивают радиоканалы на высоких, средних и ультравысоких частотах. При получении сигнала бедствия на любой частоте автоматически указывается знак вызова судна, что позволяет определить местонахождение судна с помощью спутников и наземных служб и вызвать спасательные бригады, но в любой обстановке бедствия экипаж не может просто дожидаться спасательных бригад.

В контексте дальнейшего изложения использованы термины «деятельность», «экстремальная, чрезвычайная ситуации», требующие толкования.

Деятельность, исходя из толкового словаря, – это работа, систематическое применение своих сил в какой-нибудь области. Деятельность – это специфически человеческая активность, регулируемая сознанием, порождаемая потребностями, т.е. деятельностью можно назвать любую активность человека [2].

Экстремальная ситуация (лат. *extremum* – крайнее, предельное; *situatio* – положение) – понятие, посредством которого дается интегративная характеристика радикально или внезапно изменившейся обстановки, связанных с этим особо неблагоприятных или угрожающих факторов для жизнедеятельности человека, а также высокой проблемностью, напряженностью и риском в реализации целесообразной деятельности в данных условиях [3].

Иначе говоря, экстремальность ситуации определяют факторы, к которым человек еще не адаптирован и не готов действовать в их условиях. Экстремальная ситуация человека исключает возможность быстрой помощи со стороны других людей. В зарубежной литературе экстремальная ситуация – это почти несчастный случай, который не приводит к гибели или увечью человека. Степень экстремальности ситуации определяется силой, продолжительностью, новизной, непривычностью проявления этих факторов.

В последние годы понятие «экстремальные ситуации» обретает статус одной из унифицированных, генерализующих категорий в катастрофологии, конфликтологии, теории безопасности, теориях менеджмента по оптимизации управления, оперативному управлению и др.

Понятие «экстремальная ситуация» отражает не просто чрезвычайное, а именно исключительно опасное событие или совокупность опасных событий.

Понятие «чрезвычайный» трактуется как «исключительный, очень большой, превосходящий все» [4]. Чрезвычайная ситуация – обстановка на отдельной территории или субъекте хозяйствования на ней или водном объекте, которая характеризуется нарушением нормальных условий жизнедеятельности населения, вызванная катастрофой, аварией, пожаром, стихийным бедствием, эпидемией, эпизоотией, эпифитотией, применением средств поражения или другим опасным событием, которое привело (может привести) к возникновению угрозы жизни или здоровью населения, большого количества погибших и пострадавших, причинению значительного материального ущерба, а также к невозможности проживания населения на такой территории или объекте, проведение на нем хозяйственной деятельности [5].

Отличие чрезвычайной ситуации от экстремальной» чрезвычайные ситуации отличаются от экстремальных прежде всего своими масштабами и тяжестью последствий. Чрезвычайная ситуация, в отличие от экстремальной ситуации, более масштабна, охватывают большую территорию и угрожают большему числу людей. Деление на чрезвычайные ситуации в отличие от экстремальных ситуаций, условное. Экстремальная ситуация может перейти в чрезвычайную ситуацию, например, возгорание может перейти в пожар.

Человек оказывается в экстремальных ситуациях по разным причинам, но, пожалуй, чаще всего это случается по его собственной вине – в результате отсутствия опыта безопасного поведения либо пренебрежения к нормам, правилам безопасности, непредусмотрительности, а порой и легкомыслия.

**Актуальность исследований.** Итак, при любом виде опасности для человека создается экстремальная ситуация.

Знание поведения человека в экстремальных ситуациях в современных условиях является особенно актуальным, так как изучение основных аспектов реагирования человека в экстремальной ситуации позволяет обеспечить безопасность личности и всего экипажа в той или иной экстремальной ситуации в процессе их профессиональной деятельности на морских судах.

Экстремальные ситуации, которые для большинства людей являются крайне неблагоприятными, т.е. далеко не все члены экипажа, оказавшиеся в экстремальной ситуации, способны к активности и целесообразным действиям, в тоже время для определенной группы людей могут рассматриваться как условия профессиональной деятельности.

Возникает вопрос: «Почему большинство лиц, оказавшихся в экстремальной ситуации, частично теряют контроль над своим поведением, а профессионалы в этих условиях действуют успешно?».

Поэтому **целью данной работы** является проведение эмпирического научного исследования по выяснению причин, обуславливающих возможность успешной деятельности в экстремальных условиях с одной стороны, с другой стороны выяснение многих факторов, мешающих ее осуществлению, и как результат – необходимость проведения профессионального отбора и подготовки членов экипажа.

**Результаты эмпирического научного исследования.** В данном случае эмпирическое научное исследование – действие, непосредственно направленное на объект и основанное на результатах наблюдения. Эмпирия (лат.) – опыт.

В условиях экстремальных ситуаций для экипажа судна можно выделить следующие особенности, в которых он оказывается на судне:

– опасность. Деятельность людей осуществляется под угрозой экстремальной ситуации. Это обуславливает у некоторых членов экипажа чувство высокой напряженности, неуверенности и другие;

– дефицит времени. Деятельность людей в период экстремальной ситуации происходит в условиях, когда все мероприятия требуется осуществлять либо в минимальный, либо в ограниченный период времени;

– особенности выполняемых действий и их организации. В период возникновения экстремальной ситуации членам экипажа приходится выполнять действия и принимать решения, большинство из которых носит неординарный характер;

– относительная изоляция. Рвется привычная система социальных отношений. Перед опасностью все равны. Люди объединены происходящими событиями, без учета психологической совместимости и должны действовать сообща в целях спасения собственных жизней;

– недостаток ресурсов. Функционирование в экстремальной ситуации может быть сопряжено острым дефицитом ресурсов, который может иметь место в течении определенного периода времени.

– ответственность. Экстремальная ситуации зачастую требует чрезвычайных мер воздействия. В экстремальных периодах возникает необходимость ужесточения дисциплины. Возрастает значение контроля над различными аспектами реализуемых мероприятий. При этом резко повышается степень ответственности руководителей за принимаемые решения, а исполнителей – за осуществляемые действия.

По имеющимся данным, далеко не все люди, оказавшиеся в экстремальной ситуации, способны к активным и целенаправленным действиям:

- 50–75 % потерпевших оказываются в состоянии ошеломления;
- у 12–25 % наблюдается истерические реакции;
- 12–25 % сохраняют самообладание.

Различие в поведении людей, выполняющих профессиональные обязанности в экстремальных условиях деятельности, в большей степени обусловлены их способностью контролировать свое состояние, адекватно оценивать возникшую ситуацию и своевременно принимать решения.

Восприятие одной и той же ситуации каждым конкретным человеком индивидуально. При возникновении экстремальной ситуации чем быстрее человек ориентируется, примет решение и выберет правильный способ действий, тем больше у него будет шансов остаться живым, здоровым и невредимым. Но лучше всего научиться предвидеть возможность появления опасной ситуации, уметь из нее выходить, обладая знаниями и умениями.

Эмпирические исследования показали, что к причинам, обуславливающим возможность успешной деятельности человека в экстремальных условиях, прежде всего, следует отнести особенности его личности.

При возникновении любой осознаваемой человеком экстремальной ситуации, содержащей угрозу для его жизни, у него возникает тревожное состояние и страх.

У неподготовленных людей, в зависимости от ситуации и от особенностей личности человека, страх сопровождается появлением измененного состояния сознания. Страх заставляет допускать непоправимые ошибки. Он мешает думать и решать необходимые для выживания задачи.

Даже если человек смог подавить свой страх или неуверенность, это не значит, что он исчез. На самом деле страх удерживается внутри и приносит человеку невероятное количество душевых сил. А сдержанность рано или поздно приводит к срывам, ошибкам. Однако даже люди со всеми этими особенностями могут собраться и преодолеть свои слабости.

Отметим, что с проявлением массового страха перед реальной или воображаемой угрозой, состоянием периодического испуга, ужаса связано с паникой, как одной из форм поведения толпы.

Чтобы легче было справиться со своим психическим состоянием при экстремальной ситуации и не поддаться панике, необходимо соблюдать следующие правила:

– не отчаивайтесь, находясь в одиночестве или в окружении людей в таком же психическом состоянии;

- окажите посильную помощь взрослым в ликвидации последствий экстремальной ситуации;
- избегайте того, кто сеет панику, говорит о безысходности ситуации, постарайтесь изолировать паникера и др.

Считается, что паника – от недостатка подготовки. Если человек знает, что делать в той или иной экстремальной ситуации, шансов выжить у него значительно больше, чем у того, кто позволит себе поддаться панике.

Ещё одним «врагом» человека является эмоциональное напряжение.

Итак, экстремальная ситуация произошла. Вначале человек должен избавиться от личного страха, не принимать эмоциональные прямолинейные решения, основанные на инстинкте самосохранения, следует оценить ситуацию в целом, наметить наиболее безопасную линию поведения,

Деятельность людей в особых, экстремальных ситуациях требует качественного профессионального отбора.

Многовековой опыт человечества показывает, что подготовленные люди умеют быстро и без паники справиться в экстремальных ситуациях со страхом, волнением, тревогой и противостоять опасности.

Международной конвенцией «О подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года», измененной Конвенцией 1995 года (ПДНВ-78/95) определены виды обучения, перечень знаний и навыков, метод демонстрации компетентности, который должен быть достигнут в результате обучения.

Современная концепция обучения предполагает широкое использование в учебном процессе различных тренажерных комплексов. Сегодня тренажерная подготовка стала одним из основных условий повышения подготовленности судового персонала. Тренажерная подготовка обеспечивает отработку действий в помещениях позволяющих создавать реальную обстановку экстремальных ситуаций, которые в реальных условиях не могут быть воссозданы из-за опасности возникновения фактических аварий и человеческих жертв.

При подготовке морских специалистов Конвенция предъявляет конкретные требования к тренажерам, т.е. при оценке тренажера рассматриваются следующие классификационные критерии:

- способным удовлетворять специальным целям оценки;
- воспроизводить эксплуатационные возможности соответствующего судового оборудования с такой степенью реальности, которая соответствует целям оценки, и включает возможности, ограничения и вероятные ошибки такого оборудования;
- обеспечивать поведенческий реализм (т.е. до какой степени адекватности тренажер повторяет функционирование судового оборудования, чтобы дать возможность экзаменуемому продемонстрировать свои навыки);
- обеспечивать взаимосвязь, с помощью которой лицо, проходящее подготовку, может взаимодействовать с оборудованием и воспроизводимой окружающей обстановкой и, если необходимо, с инструктором;
- позволять экзаменатору контролировать, наблюдать и вести запись действий кандидатов с целью эффективной оценки таких действий.

После прохождения соответствующей подготовки уже дипломированный морской специалист должен обладать достаточно высоким уровнем профессиональных знаний и умений, чтобы действовать в экстремальных ситуациях.

Таким образом, отметим, что в идеальном случае хорошо подготовленный и натренированный экипаж окажется способным управлять экстремальной – аварийной ситуацией, будет четко следовать инструкциям (на каждом судне имеются заранее разработанные аварийные планы (Contingency Plans), содержащие последовательность необходимых действий, процедуры и инструкции на случай той или иной экстремальной – аварийной ситуации) и обеспечит своевременную эвакуацию и спасение всех людей на судне, т.е. экипаж судна обязан быть способным немедленно реагировать на

возникновение любой экстремальной ситуации с тем, чтобы своевременно предпринять все необходимые действия по спасению судна и жизни на борту. Такие действия должны быть эффективными и слаженными, что возможно при условии, когда каждый член судовой команды знает, как и зачем он должен действовать в такой ситуации. Это может быть достигнуто регулярными занятиями и тренировками, проводимыми с экипажем судна. Всем офицерам судна необходимо понимать, что когда возникает экстремальная – аварийная ситуация на судне – как правило, нет времени на разработку стратегий, как нет и возможности обучать персонал, что они должны делать в случае тревоги. Без регулярных занятий, тренировок и учений, многие члены судовой команды попросту не явятся на свои места сбора, поставив своих товарищей и коллег перед лицом неразрешенных задач.

**Вывод.** Деятельность членов экипажа в особых, экстремальных условиях требует качественного профессионального отбора и подготовки. К экстремальным ситуациям нужно готовиться, нужно учиться управлять собой и своим поведением. Такую подготовку можно назвать обеспечением собственной психологической безопасности. Уровень подготовки людей – один из важнейших факторов готовности морских специалистов к действиям в экстремальных ситуациях.

Результаты данной работы найдут свое место в случаях преодоления членами экипажа любой экстремальной ситуации на морском судне.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дулин В. Н. Развитие профессионального опыта морских специалистов в учебно-тренажерных центрах / В. Н. Дулин : дис. канд. пед. наук. – Калининград, 2006. – 110 с.
2. Подолец В. В. Самоорганизация, деятельность и проблемы человека / В. В. Подолец // Новое понимание философии: проблемы и перспективы. – М. : РАН, 1993. – С. 116-118.
3. Новейший философский словарь ; Сост. А. А. Грицанов. – Мн. : Изд. В. М. Скаун, 1998. – 896 с.
4. Ожегов С. И. Словарь русского языка / Под ред. чл.-корр. АН СССР Н.Ю. Шведовой. – М. : Русский язык, 1987. – 797 с.
5. Кодекс гражданской защиты Украины № 5403-VI, от 2 октября 2012 г.

#### **Годованюк С. П. ДІЯЛЬНІСТЬ ЕКІПАЖУ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ВИРОБНИЧИХ СИТУАЦІЯХ НА МОРСЬКОМУ СУДНІ, ПРОФЕСІЙНИЙ ВІДБІР І ПІДГОТОВКА**

*В роботі проведено аналіз причин аварій на морі, розкрито поняття «людський фактор» стосовно до безпеки мореплавання. У контексті викладу роботи використані терміни «діяльність», «екстремальна, надзвичайна ситуація», що вимагають тлумачення. Показана актуальність роботи у розкритті поведінки людини в екстремальних ситуаціях у процесі їх професійної діяльності на морських суднах, що визначило мету роботи у вигляді проведення емпіричного наукового дослідження щодо з'ясування причин, що зумовлюють можливість успішної діяльності в екстремальних умовах з одного боку, з іншого боку з'ясування багатьох факторів, що заважають її здійсненню і як результат необхідність проведення професійного відбору та підготовки членів екіпажу. Емпіричні дослідження показали, що до причин, що обумовлюють можливість успішної діяльності людини в екстремальних умовах, насамперед, слід віднести особливості його особистості. Показано, що діяльність людей в особливих, екстремальних ситуаціях вимагає якісного професійного відбору, а добре підготовлений і натренований екіпаж виявиться здатним керувати екстремальною ситуацією.*

**Ключові слова:** діяльність, екстремальна, надзвичайна ситуація, людський фактор, морське судно, професійний відбір, підготовка членів екіпажу.

**Godovanyuk S.P. ACTIVITY OF CREWMEMBERS IN EXTREME SITUATIONS ONBOARD SHIPS, PROFESSIONAL SELECTION AND TRAINING**

*The paper analyzes the causes of accidents at sea, reveals the concept of the human factor in relation to the safety of navigation. Such terms as activity, extreme or emergency situations are exploited and given their further interpretation. The importance of the work in uncovering human behavior in extreme situations in the course of their professional activities on marine vessels determined its purpose in the form of an empirical research to ascertain the reasons for successful work in extreme conditions on the one hand, and the elucidation of many factors hindering its implementation on the other hand. All the factors stated enhance the necessity for professional selection and training of crew members. Empirical studies have proved that personal features of seafarers should be mentioned above all the reasons, which ensure the possibility of successful human activities in extreme conditions. It is shown that the activity of people in particular extreme situations requires professional selection. Hence, high-quality and well-trained crew will be able to manage extreme situations.*

**Keywords:** activity, extreme, emergency situation, the human factor, a ship, professional selection, training of crew members.

© Годованюк С.П.

Статтю прийнято  
до редакції 27.11.14

## PREFERENCES DISTRIBUTIONS DENSITIES FOR A COMMON CONTINUOUS ALTERNATIVE

*Goncharenko A.V.*

*The article reveals an attempt to solve a problem of optimal control over the situation of multi-alternativeness and proneness to conflict of operational modes. Due to the research, a new approach discloses a scientific explanation and prognosis of the optimal ways of marine vessels operation and control adjusting the environmental protection support on the basis of the subjective entropy maximum principle. The attempt was made in application to the ballast water treatment. The author obtained preferences distributions densities for a common continuous alternative on the basis of a special kind functional with the effectiveness function set in a logical condition.*

**Keywords:** *dangerous goods, harmful substances, ballast operations, operational effectiveness, optimal control, subjective entropy maximum principle, variational problem, Euler-Lagrange equation, preferences distribution density.*

**Introduction.** A discussion on the topic of the rational modes of operation concerning a concept of ballast water treatment optimal intensity on the basis of multi-alternativeness initiated in work [1] has many applications.

**Urgency of researches.** It is an actual task to prolong such a type of researches as a kind of a process of a multi-alternative operational modes control for a few special cases of alternatives and their possible combinations. It is an important scientific problem to generalize previously obtained results.

**Analysis of the latest researches and publications.** In the previous publication [1] we have theoretically considered and analyzed the processes of the ship water ballast treatment and found the optimal value with the use of a preference function for a continuous alternative.

Similarly to that, it was considered some cases of alternatives in works [2, 3]. At the decision making, the responsible person's controlling behavior is driven by the laws of subjective conservatism [4].

Theoretical foundations are monographs [5–7].

The necessary information for the illustrative applications is adopted from the international source [8].

**The task setting.** In this paper we will be finding a continuous alternative preferences distribution, common for two discrete alternatives, each of which has a continuous alternative in the view of the common variated parameter.

**The main content (material).** The idea is to continue studying the operational modes combinations started in [1–4] in order to generalize modeling dependences of control in situations with possible alternative strategies, for example, applicably to a ship ballast water treatment. The entropy of preferences is a tool.

**The problem formulation.** Accordingly to [1–3] we have got the solution of a simplest variational problem in the view of the canonical distribution of the active system controlling individual's preferences on the basis of the subjective entropy extremization principle [4–7].

Now, let us consider a more general case with a functional with an integrand of a special kind.

Let the first alternative strategy or operational mode is given with the functional

$$\Phi_{\pi_1} = \int_{x_0}^{x_1} [-\pi_1(x) \ln \pi_1(x) - \beta_1 \pi_1(x) R_1(x)] dx + \gamma \left[ \int_{x_0}^{x_1} \pi_1(x) dx - 1 \right], \quad (1)$$

where  $[x_0 \dots x_1]$  – possible changing diapason of the continuous parameter  $x$ ;  $\pi_1(x)$  – function of the individual's subjective preferences distributed on the set of reachable for the responsible

person's goals continuous alternative related to the parameter of  $x$ ;  $\beta_1, \gamma$  – structural parameters [1–7];  $R_1(x)$  – function of effectiveness.

For the second alternative

$$\Phi_{\pi_2} = \int_{x_0}^{x_1} [-\pi_2(x) \ln \pi_2(x) - \beta_2 \pi_2(x) R_2(x)] dx + \gamma \left[ \int_{x_0}^{x_1} \pi_2(x) dx - 1 \right]. \quad (2)$$

Herewith in the expressions of (1) and (2) we imply the same possible changing diapason of the continuous parameter  $x$ . However the structural parameters  $\gamma$  may be different, although we do not distinguish them, denoting as the Lagrange uncertainty multipliers.

For the common distribution in the case of these two competing alternatives we have got the analogous view functional

$$\Phi_{\pi} = \int_{x_0}^{x_1} [-\pi(x) \ln \pi(x) - \beta \pi(x) R(x)] dx + \gamma \left[ \int_{x_0}^{x_1} \pi(x) dx - 1 \right], \quad (3)$$

but, the integrand in (3) is given with the logical equation

$$R(x) = \begin{cases} R_2(x) & \text{if } R_2(x) < R_1(x), \\ R_1(x) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

The sign « $\ll$ » in combination with « $-\beta$ » at  $\beta > 0$  is for the minimal value of  $\Phi_{\pi}$ . In case of searching for the maximum, they should be changed for the opposite.

The condition (4) does not mean choosing either  $\pi_1(x)$  or  $\pi_2(x)$  depending upon the relative function of effectiveness. It will be illustrated with the problem solution that it is not just a choice of  $\pi_1$  and  $\pi_2$ .

**The problem solution.** On choosing the desired view of the operational functional (1-3) with respect to the equation (4) we get the canonical distributions of the subjective preferences applying the necessary conditions for extremums in the view of Euler-Lagrange equations for the variational problems

$$\frac{\partial R^*}{\partial \pi_i} - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial R^*}{\partial \pi'_{i,x}} \right) = 0, \quad (5)$$

where  $R^*$  – the under-integral function of the corresponding integral (1-3);  $\pi'_{i,x}$  – the first derivative of the corresponding sought preference function with respect to the independent variable  $x$ .

In our simplest case

$$\frac{\partial R^*}{\partial \pi'_{i,x}} \equiv 0, \quad (6)$$

therefore

$$\frac{\partial R^*}{\partial \pi_i} = 0. \quad (7)$$

Using (5-7)

$$\pi_i(x) = \frac{e^{-\beta_i R_i(x)}}{\int_{x_0}^{x_1} e^{-\beta_i R_i(x)} dx} \quad (8)$$

For the common distribution in the case of (3), the expression (8) gets the view:

$$\pi(x) = \frac{e^{-\beta R(x)}}{\int_{x_0}^{x_1} e^{-\beta R(x)} dx} \quad (9)$$

where  $R(x)$  satisfies the condition (4).

**Practical application of the problem solution.** For a practical application of the problem solution we consider, for example, a concept of [1-3].

For the ship operators, the major problem is to make optimal decisions concerning the modes of operation and effective functioning of their vessels.

According to [8] and following [1] we will consider a variation of the controlled parameter  $x$  (the intensity of the ballast water treatment) and a few, however, principal functions dependent upon the parameter. These are:  $Y(x)$  – harmful effects in total, resulting from the ballast waters organisms, their sediments, and other negative factors that accompany the processes of the ballast water treatment;  $S(x)$  – total, separately for the spent efforts, effects of the treatment implementation; and the summary result:  $R(x)$  of the both effects:  $Y(x)$  and  $S(x)$ , which on condition of a common dimension would be

$$R(x) = S(x) + Y(x). \quad (10)$$

The environmental protection engineering paradigm says that  $Y(x)$  has a general tendency for decreasing and  $S(x)$  – for increasing while the intensity of the corresponding environmental protection measures support:  $x$  grows. In such circumstances we look for the minimal value of  $R(x)$  with respect to  $x$ , which is believed to be the optimal.

Taking into account the discrete or continuous character of the parameter of  $x$ , we consider a corresponding set of operational alternatives and get the operational controlling functions in the view of canonical distributions of individual preferences [1–7] that symbolizes the effectiveness of the vessel’s functioning, thus the optimal control of her operation in the situation of multi-alternativeness.

As for a ship ballast water treatment, numerical simulation with the use of some mathematical modeling dependencies demonstrates the optimal generalized intensity of the ballast water treatment.

Supposing the continuous character of the intensity  $x$  in the possible changing diapason  $[x_0 \dots x_1]$  and the mathematical modeling dependencies similar to [1]

$$Y(x) = \frac{1}{a(x-d)}, \quad (11)$$

where  $a$  and  $d$  – parameters;

$$S(x) = b(x-d)^c, \quad (12)$$

where  $b$  and  $c$  – parameters; we obtain the model for expression (10):

$$R(x) = b(x-d)^c + \frac{1}{a(x-d)}. \quad (13)$$

In analogy to [1]-[3], we define the operational functionals (1-3) with respect to the equations (4), (10-13).

The sought individual's preferences functions will have got the canonical view (8), (9) accordingly to the considered problem setting.

It is quite easy to check that, obviously, the normalizing conditions in each problem setting are satisfied:

$$\int_{x_0}^{x_1} \pi(x) dx = 1. \tag{14}$$

**The researches results.** The calculation experiment for (1-14) with the assumed data is illustrated in fig. 1.

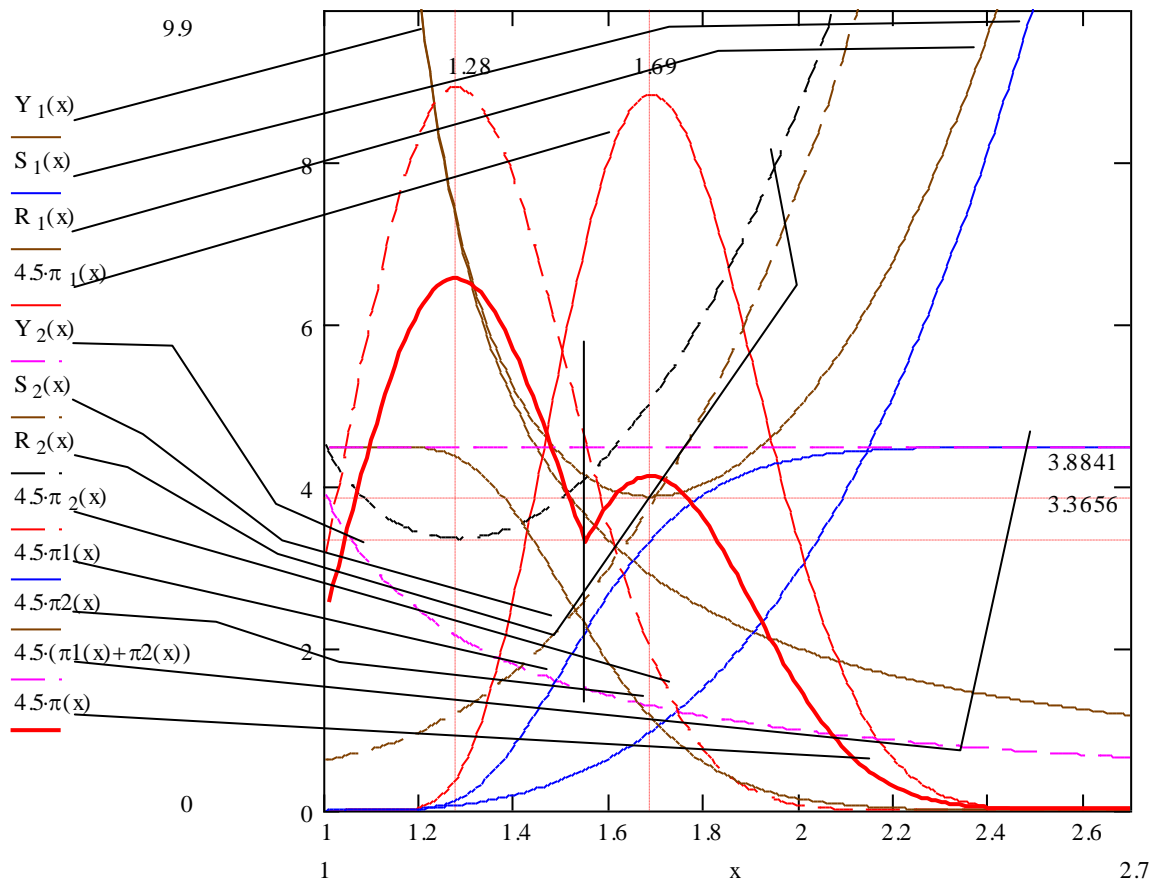


Fig. 1 – The optimal values of the operational alternatives as the intensity of the ballast water treatment and its controlling functions as the individual preferences function densities distributed on the continuous alternatives

The assumed data accepted for the operational functional (1):  $x_0=1$ ;  $x_1=3$ ;  $a=0.5$ ;  $c=3$ ;  $b=3$ ;  $d=1$ ;  $\beta=0.9$ .

For the second considered operational functional (2), there are differences in  $a=0.75$ ;  $d=0.657$ ; and

$$S(x) = 0.5 + b(x-d)^c. \tag{15}$$

From the diagrams in fig. 1 it is noticeable that for the common continuous alternative, the preference function of  $\pi(x)$  shows up a convenient shape of the normalized value with the density distribution and relative magnitudes. This is not visible with the density distributions of  $\pi_1(x)$  or  $\pi_2(x)$  only.

The other case is shown in fig. 2.

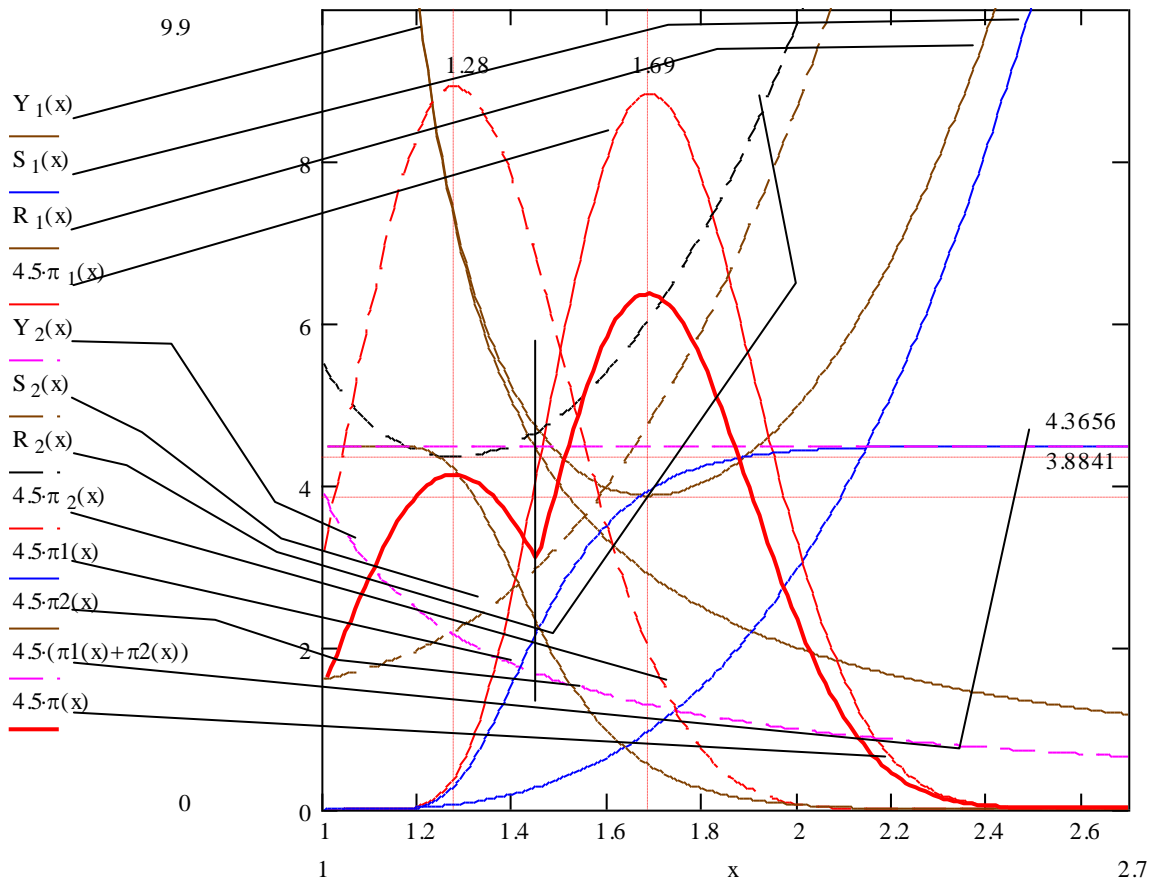


Fig. 2 – Change of the optimal values of the controlling functions as the individual preferences function densities

In the case illustrated in fig. 2 it is visible that the density distributions of  $\pi_1(x)$  and  $\pi_2(x)$  have not changed in comparison with the previous distribution. The difference was for equation (15)

$$S(x) = 1.5 + b(x - d)^c \tag{16}$$

The preferences for the discrete alternatives  $\pi_1(x)$  and  $\pi_2(x)$  show how much and which of them is better just for a certain value of the independent variable of  $x$ . The preferences distribution densities  $\pi_1(x)$  and  $\pi_2(x)$  show the optimal values of the continuous alternatives separately (see fig. 1 and fig. 2).

**Conclusions.** Due to the suggested approach, with the use of a functional compiled in a special way (3) that implies a logic condition (4), the obtained preferences distributions densities for a common continuous alternatives (9) allow carrying out a conflict free control of operational strategies and modes, for example, a ship’s ballast water treatment.

The optimal control in the considered operational situations needs a comparison of the initial discrete alternatives through their preferences functions.

**Prospects of further researches.** For further researches it is prospective to deal with the entropy paradigm in studying multi-alternativeness of operational situations on conditions of possible conflicts with the use of the methods (1)-(16) applicably to other more general cases of operational control.

## LIST OF THE USED LITERATURE

1. Goncharenko A. V. A concept of ballast water treatment on the basis of multi-alternativeness / A. V. Goncharenko, V. A. Evdokimova // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014) [Збірка матеріалів VI Міжнародної науково-практичної конференції. (27–29 травня 2014 р., Херсон)]. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2014. – С. 18-21.
2. Goncharenko A. V. Control of flight safety with the use of preferences functions / A. V. Goncharenko // Electronics and control systems: Scientific journal. – Kyiv : Publishing house «Osvita Ukraini», 2013. – № 3(37). – С. 113-119.
3. Goncharenko A. V. Expediency of unmanned air vehicles application in the framework of subjective analysis / A. V. Goncharenko // 2013 IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference «Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments» Proceedings. Section B. UAV Production and Service : Maintenance, Methods and Systems of Navigation and Flight Control Equipment Testing. – K. : Освіта України, 2013. – pp. 129-133.
4. Goncharenko A. V. Some identities of subjective analysis derived on the basis of the subjective entropy extremization principle by Professor V.A. Kasianov / A. V. Goncharenko // Automatic Control and Information Sciences. – 2014. – Vol. 2, No. 1. – P. 20-25.
5. Kasianov V. Subjective entropy of preferences. Subjective analysis : monograph / V. Kasianov. – Warsaw, Poland : Institute of aviation, 2013. – 644 p.
6. Касьянов В. А. Субъективный анализ : монография / В. А. Касьянов. – К. : НАУ, 2007. – 512 с.
7. Касьянов В. А. Элементы субъективного анализа : монография / В. А. Касьянов. – К. : НАУ, 2003. – 224 с.
8. IMO Assembly Resolution A 868(20) Guidelines for the control and management of ship's ballast water to minimize the transfer of harmful aquatic organisms and pathogens, adopted on 27 November 1997. – 17 p.

**Гончаренко А.В.** ЩІЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛІВ ПЕРЕВАГ ДЛЯ СПІЛЬНОЇ НЕПЕРЕРВНОЇ АЛЬТЕРНАТИВИ

*Здійснено спробу розв'язати проблему оптимального керування для ситуації багатоальтернативності та конфліктності експлуатаційних режимів. У цій статті запропоновано підхід, що дає наукове пояснення та прогноз оптимальних шляхів експлуатації та керування морськими суднами із урахуванням підтримання охорони навколишнього середовища на основі принципу максимуму суб'єктивної ентропії. Спробу здійснено у застосуванні до обробки баластних вод. Отримано щільності розподілів переваг для спільної неперервної альтернативи на основі функціоналу спеціального виду із функцією ефективності, заданою через логічну умову.*

**Ключові слова:** небезпечні вантажі, шкідливі речовини, баластні операції, експлуатаційна ефективність, оптимальне керування, принцип максимуму суб'єктивної ентропії, варіаційна задача, рівняння Ейлера-Лагранжа, щільність розподілу переваг.

**Гончаренко А.В.** ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ДЛЯ ОБЩЕЙ НЕПРЕРЫВНОЙ АЛЬТЕРНАТИВЫ

*Осуществлена попытка решить проблему оптимального управления для ситуации многоальтернативности и конфликтности эксплуатационных режимов. В этой статье предложен подход, который дает научное объяснение и прогноз оптимальных способов эксплуатации и управления морскими судами с учетом поддержания охраны окружающей среды на основе принципа максимума субъективной энтропии. Попытка осуществлена в приложении к обработке балластных вод. Получены плотности распределений предпочтений для общей непрерывной альтернативы на основе функционала специального вида с функцией эффективности, заданной через логическое условие.*

**Ключевые слова:** опасные грузы, вредные вещества, балластные операции, эксплуатационная эффективность, оптимальное управление, принцип максимума субъективной энтропии, вариационная задача, уравнение Эйлера-Лагранжа, плотность распределения предпочтений.

© Гончаренко А.В.

Статтю прийнято  
до редакції 7.09.14

## АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ВЫБОРЕ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ БАЛЛАСТА

*Горбов В.М., Митенкова В.С.*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

*В данной статье выполнен анализ технико-экономических показателей, определяющих эффективность оборудования обработки балластных вод. Основной целью исследования являлось обоснование характеристик, необходимых для рационального выбора установок бортовой обработки балласта при проектировании новых судов или модернизации существующих. Учитывая многообразие доступных на рынке установок очистки балласта, для окончательного проектного решения необходимо использовать методы технико-экономического и статистического анализа большого количества показателей. В статье приведены качественные параметры, которые необходимо учитывать при выборе технологических схем обработки. Были определены диапазоны изменения массогабаритных показателей, значений потребляемой установками мощности, капитальных и эксплуатационных затрат. Выделены основные возможные факторы негативного воздействия на окружающую среду и безопасность экипажа со стороны оборудования обработки балласта. Анализ этих параметров даст возможность обосновывать рациональные технические решения на стадии концептуального проектирования судов и разработать комплексный показатель эффективности установок обработки балласта.*

**Ключевые слова:** *обработка балласта, технико-экономические показатели, потребляемая мощность, массогабаритные характеристики, ультрафиолетовая обработка, электролиз, фильтрация, хлорирование.*

**Постановка проблемы.** Возникающее вследствие перемещения балласта из одной области в другую «биологическое загрязнение» (инвазия), может привести к бесконтрольному размножению чужеродных видов морских организмов, вызвать угнетение или вытеснение местных видов, распространение болезней и паразитов и другие проблемы [1, 2]. Международная морская организация (ИМО) в ответ на проблему приняла законодательные ограничения, направленные на контроль и предотвращение загрязнения чужеродными организмами. Так, в 2004 г. ИМО была принята «Конвенция по контролю и управлению балластными водами и осадками» [2]. Согласно Конвенции с 2009 г. на всех судах должны приниматься меры для предотвращения загрязнения балластными водами путем их замены (стандарт D1) или обработки (стандарт D2). Изначально предусматривалось, что в период 2012–2017 гг. стандарт D2 вступит в силу для всех типов судов. Но из-за ряда сложностей, связанных с внедрением и использованием систем обработки балласта, эти требования пока не действуют повсеместно [3, 4]. Тем не менее, вопрос обработки балластных вод для предотвращения попадания чужеродных микроорганизмов с судов является достаточно **актуальным**, так же, как и рациональный выбор соответствующего оборудования при проектировании или модернизации судов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Во многих странах проводятся исследования, связанные с технологиями бортовой обработки балластных вод. Достаточно много публикаций в данной области представлено классификационными обществами (DNV, ABS, GL и другими). Например, в отчете, представленном Американским бюро судостроения (ABS), проведен обзор и сравнение оборудования для обработки балласта разных производителей [5]. Подобное исследование с представлением обобщенных рекомендаций по выбору технологий очистки было представлено и Lloyd's Register [6]. Комплексные исследования по оценке эффективности технологии обработки балластных вод соединениями на основе хлора приведены в работах [7, 8]. Выбору рациональных характеристик установки, сочетающей технологии фильтрации и ультрафиолетовой дезинфекции, посвящена публикация [9]. Исследования технологий обработки балласта объёмным путем в балластных танках и электрохимическим способом представлены в работах [10] и [11], соответственно.

Комплексная оценка технико-экономических характеристик и обоснование рационального выбора оборудования для обработки балласта представлена в отчете [12]. Но в данной работе оборудование выбиралось для малых судов внутреннего района плавания в США, где требования к обработанному балласту гораздо жестче, чем требования «Конвенции по контролю и управлению балластными водами и осадками». Кроме того, большая часть рассматриваемых в работе вариантов имеет малую производительность и использует технологии, не предназначенные для применения на морских судах. В известных публикациях не уделялось достаточного внимания вопросам, связанным с комплексной оценкой технико-экономических параметров установок обработки балласта, предназначенных для использования на средних и больших судах.

**Цель статьи** – обоснование характеристик, определяющих эффективность различного оборудования обработки балластных вод, что даст возможность обосновать рациональные проектные решения при создании новых или модернизации действующих судов при использовании этих технологий.

**Изложение основного материала.** Длительное время на судах основным способом предотвращения загрязнения морской среды являлась замена балласта, которая заключалась в том, что перед заходом в порт проводилась замена в нейтральных водах не менее 95 % объема принятого балласта на «свежий».

Выделяют следующие методы его реализации [13, 14]:

- последовательная замена (включает осушение и наполнение цистерн несколько раз до достижения необходимой концентрации «свежего» балласта);
- проточный метод, при котором через балластные танки прокачивается трехкратный объем их содержимого (одновременно можно осуществлять прокачку только через одну пару симметрично расположенных танков левого и правого бортов или цистерны форпика и ахтерпика);
- разбавление балласта, которое используется в основном на танкерах, т.к. для его реализации на судне должны быть дополнительные трубопроводы и насосные установки (одновременно происходит прием балласта в танки с одного борта и сброс с другого).

Несмотря на простоту концепции, замена балласта является в ряде случаев энергозатратным и трудоемким способом и, что самое главное, признана ИМО недостаточно эффективной для предотвращения инвазии. Более предпочтительным является способ обработки забортной воды на судне, включающий механические, физические и химические методы [2, 3, 5].

В современных установках очистки балласта для достижения большей эффективности чаще всего используется сочетание этих методов. Для первой ступени обработки обычно применяют механические методы, далее могут использоваться физические, химические или комбинированные (рис. 1).

Из числа приведенных на рис. 1 методов ряд из них можно отнести к комбинированным, например, электрохлорирование (физико-химический), электромеханическая сепарация (физико-механический) и т.д. В установках обработки балластных вод применяются и другие технологии, хотя не столь широко, как вышеперечисленные.

Учитывая многообразие доступных на рынке установок очистки балласта, а также регулярное появление новых предложений, возникает вопрос выбора рационального решения при проектировании нового судна или модернизации уже эксплуатируемого. При этом ни одна система не является универсальной, подходящей для всех типов судов и условий эксплуатации, а вследствие непродолжительного использования существующих систем не накоплено достаточного опыта по обслуживанию подобного оборудования. В связи с этим выбору того или иного решения должен предшествовать тщательный технико-экономический анализ большого количества показателей.

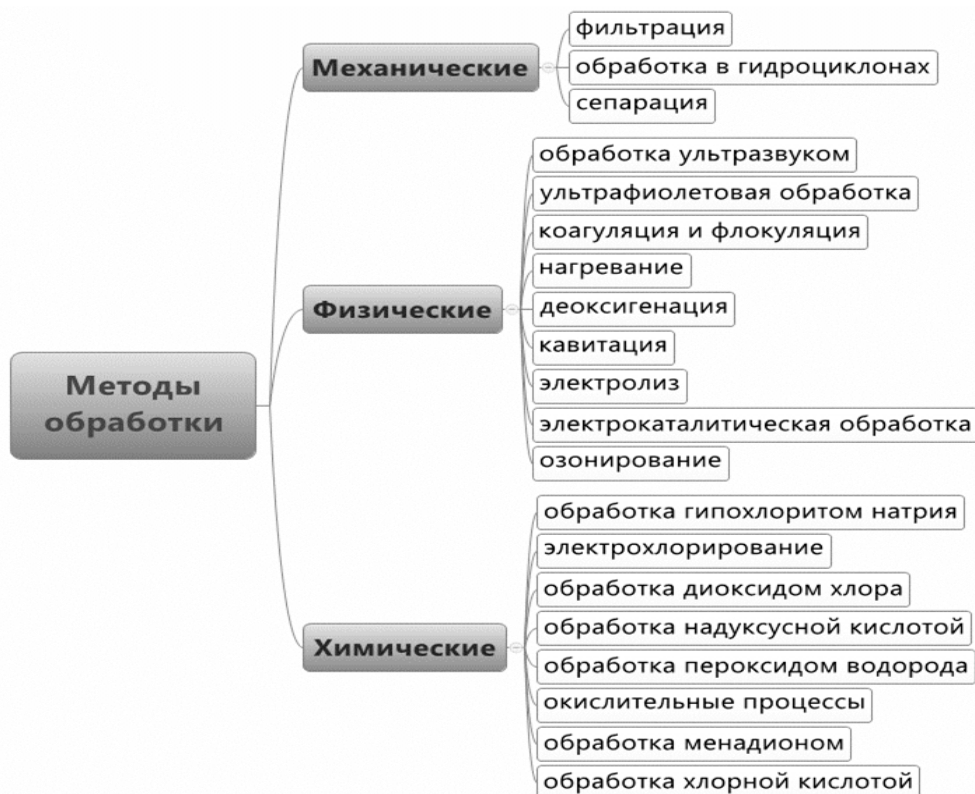


Рис. 1 – Классификация технологий обработки балластных вод

Балластная система, включая и оборудование для обработки забортной воды, является судовой системой и в качестве показателей ее качества можно использовать стандартные для судовых энергетических установок и трубопроводных систем технико-экономические характеристики [15, 16]:

- надежность;
- энергетическая эффективность;
- массогабаритные характеристики;
- экономические показатели;
- воздействие на окружающую среду и людей.

Ниже приведен развернутый анализ этих показателей применительно к оборудованию для обработки балласта на борту судна.

**Надежность.** Под надежностью понимается свойство объекта сохранять в течение установленного периода времени значения всех параметров, которые характеризуют способность выполнять определенные функции в заданных режимах и условиях использования [17]. Важнейшая функция систем обработки балласта – обеспечение заданного качества очистки балласта, отвечающего нормативным требованиям (международным или национальным, если они более жесткие). Соответствие этим требованиям подтверждается наличием специальных сертификатов. Применяемые технологии должны предварительно получить одобрение национальных администраций и/или классификационных обществ, а затем «Конвенции по контролю и управлению балластными водами и осадками».

Поскольку в большинстве установок обработка происходит в процессе приема забортной воды (проточным способом), производительность оборудования должна быть не меньше подачи балластных насосов. Время прохождения всего объема принимаемого балласта через установку не должно превышать установленную продолжительность проведения балластных и грузовых операций на судне. Производительность является одним из основных параметров при выборе очистного оборудования. Анализ данных показал, что на современных судах со значительной долей балласта от общей грузоподъемности его объем составляет в среднем от 18 до 65 тыс. м<sup>3</sup> для балкеров и от 6,5 до 95 тыс. м<sup>3</sup> для

танкеров. Для судов с относительно небольшим соотношением объема балласта к грузоподъемности эта величина составляет в среднем 3–20 тыс. м<sup>3</sup> для контейнеровозов и 3–11 тыс. м<sup>3</sup> для других типов судов. Подача установленных балластных насосов составляет в среднем 1300–3000 м<sup>3</sup>/ч для балкеров, 1100–5800 м<sup>3</sup>/ч для танкеров, 250–750 м<sup>3</sup>/ч для контейнеровозов и 250–600 м<sup>3</sup>/ч для других типов грузовых и пассажирских судов [2]. Подробнее эти данные представлены на рис. 2 и рис. 3.

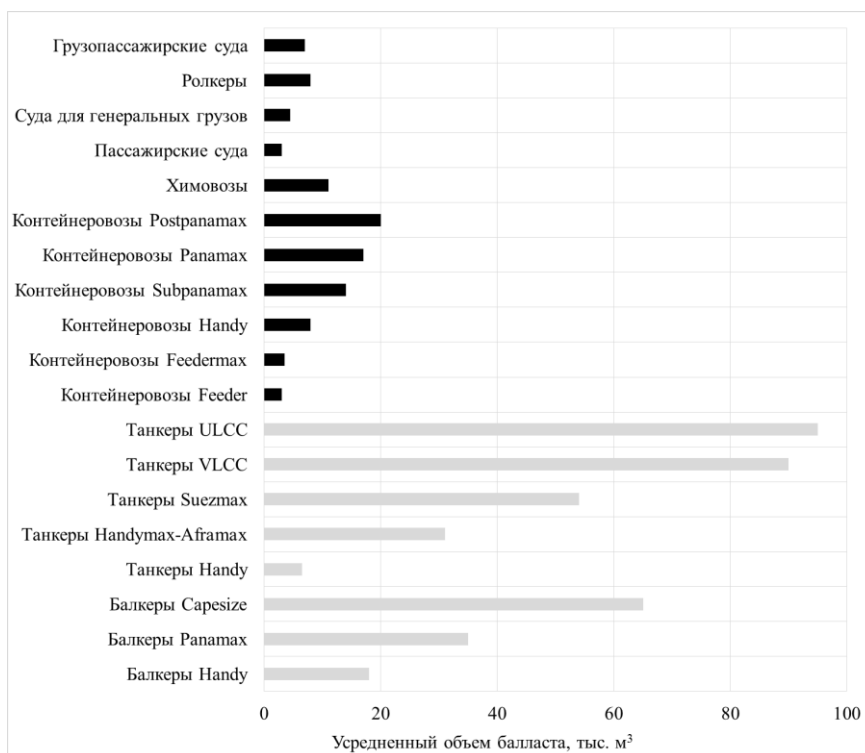


Рис. 2 – Репрезентативные значения объема балластных вод для судов с высокой и низкой долей балласта от общей грузоподъемности (обозначены серым и черными цветами, соответственно)

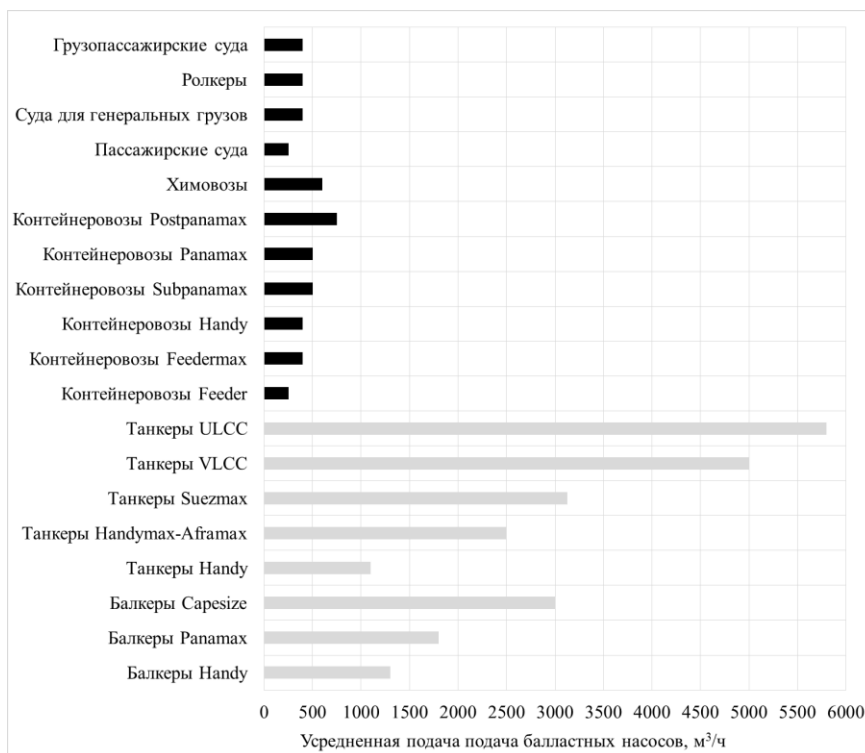


Рис. 3 – Репрезентативные значения подачи балластных насосов для судов с высокой и низкой долей балласта от общей грузоподъемности (обозначены серым и черными цветами, соответственно)

Анализ информации об установках обработки балласта показал, что на сегодняшний день на рынке доступно оборудование производительностью до 10000 м<sup>3</sup>/ч. Для большинства сертифицированных установок эта величина не превышает 6000 м<sup>3</sup>/ч, что соответствует наибольшему усредненному значению подачи балластных насосов (рис. 3). Для обработки балласта широко применяются физико-механические технологии (фильтрация + ультрафиолетовая обработка, фильтрация + электролиз). Данные по производительности таких сертифицированных установок представлены на рис. 4.

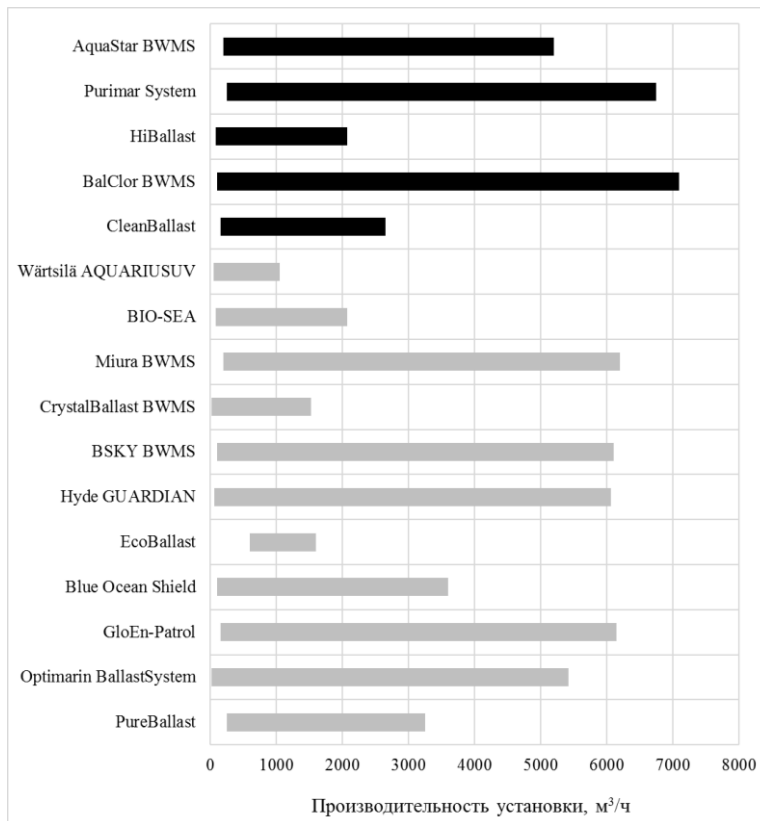


Рис. 4 – Диапазон производительности установок обработки балласта, использующих технологии (фильтрация + электролиз и фильтрация + ультрафиолетовая дезинфекция) (обозначены черным и серым цветами, соответственно)

После определения требуемой производительности установки обработки балласта на следующем этапе выбираются технологии, применяемые в современном оборудовании. Здесь следует обратить внимание на такие показатели, как особенность проведения процесса обработки (при приеме или сбросе балласта, объемным или проточным способом), время гибели живых организмов, коррозионное воздействие [2]. Сравнение этих показателей для технологий обработки балласта, получивших сегодня наибольшее распространение, представлено в табл. 1.

Применение фильтров для механической очистки балласта приводит к существенному увеличению потерь давления в системе. Габариты оборудования существенно увеличиваются с пропускной способностью, что при больших объемах балласта на судне вызовет проблемы с его размещением. Накопление осадков может вызывать проблемы в работе фильтров. Для эффективного протекания процесса деоксигенации в балластных танках должна быть применена закрытая вентиляционная система для поддержания инертной среды (табл. 1). При использовании химических методов очистки перед сбросом балласта необходимо проводить его нейтрализацию для минимизации концентрации химически агрессивных веществ, или использовать в качестве биоцидов реагенты, которые за короткий срок разлагаются в воде на безопасные составляющие.

Таблица 1 – Характеристики методов обработки балласта

<i>Технология обработки</i>	<i>Характеристика процесса</i>	<i>Когда и как происходит обработка</i>	<i>Время поряжающего воздействия</i>	<i>Коррозионное воздействие</i>
Обработка хлором	Хлор и бром, являющиеся биоцидами, получают путем электролиза на борту судна. Перед сбросом балластные воды нейтрализуют сульфатом натрия	При приеме проточным способом, нейтрализация при сбросе	Несколько часов	Высокая концентрация вызывает коррозию стальных элементов
Обработка химическими реагентами	Балластные воды смешивают со специальными химическими веществами в строго дозированной концентрации для уничтожения живых организмов. В течении времени химические реагенты расщепляются, отсутствует необходимость в нейтрализации балласта	При приеме в процессе прохождение через эжектор (проточный способ)	24 ч	Высокая концентрация вызывает коррозию стальных элементов
Фильтрация и ультрафиолетовое облучение	Фильтрация принимаемой заборной воды обычно происходит в самоочищающихся фильтрах с пропускной способностью до 50 мкм. Балласт облучается ультрафиолетовыми лучами, что приводит к образованию гидроксильных радикалов, уничтожающих бактерии и микроорганизмы	При приеме для фильтрации и УФ- облучения, при сбросе для УФ- обработки	В процессе обработки	Не влияет
Деоксигенация	На борту судна в трубе Вентури происходит смешивание инертного газа и балластной воды (проточном способ) или барботирование в балластных танках (объемный способ). Это приводит к удалению кислорода и снижению рН воды, как следствие, к гибели микроорганизмов. Для нормального протекания процесса воздух заменяется инертным газом в свободном пространстве балластных танков	При приеме для одних систем (проточный способ) и в балластных танках для других (объемный способ)	4–6 дней	Относительно низкий коррозионный эффект
Озонирование	Озон получают на борту судна, он воздействует как биоцид. Подача озона в смесительный эжектор происходит в процессе перекачке балластными насосами при приеме или сбросе заборной воды. Часто комбинируется с фильтрацией или другими методами обработки	При приеме для одних систем и при сбросе для других	до 15 ч	Ограниченное воздействие, т.к. в свободном состоянии озон существует недолго. При обработке перед сбросом воздействие отсутствует

**Энергетическая эффективность.** После выбора установки обработки балласта требуемой производительности с наличием необходимых сертификатов необходимо обратить внимание на дополнительные затраты энергии (косвенные и прямые). Косвенные – связаны с увеличением мощности приводов балластных насосов из-за дополнительных потерь давления, которые, в зависимости от применяемого оборудования, могут составлять от 0,1 до 1 бара [4]. Прямые затраты энергии могут быть достаточно существенными для некоторых физических методов обработки (электролиз, ультрафиолетовая обработка). Например, потребляемая мощность установок двухступенчатой обработки балласта The Hyde GUARDIAN® Ballast Water Treatment System (фильтрация + УФ-облучение) может составлять 300–600 кВт при производительности 4000–6000 м<sup>3</sup>/ч (рис. 5). Такие мощностные затраты могут привести к необходимости установки дополнительного стояночного дизель-генератора или замене существующего на более мощный (в 1,5–2 раза). При использовании некоторых технологий необходимая мощность может достигать 220 кВт на 1000 м<sup>3</sup>/ч производительности [2].

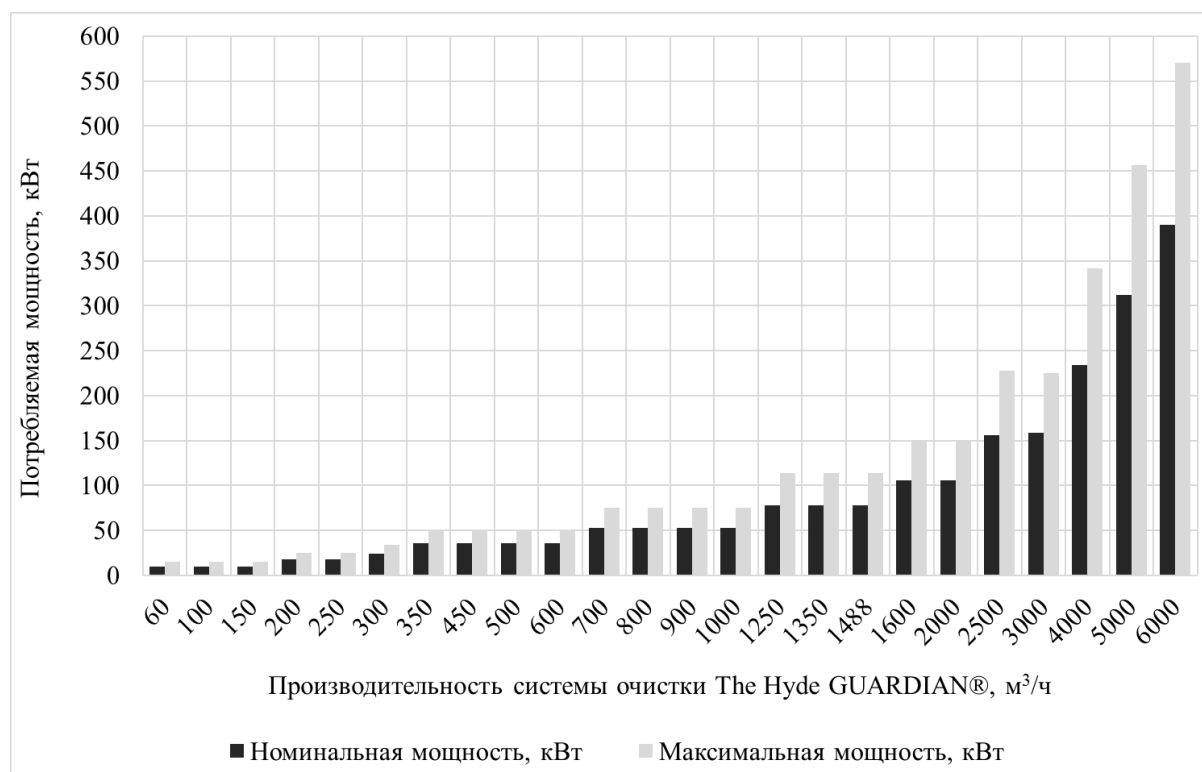


Рис. 5 – Зависимость потребляемой мощности от производительности системы обработки балласта с использованием технологий фильтрации и ультрафиолетового облучения

**Массогабаритные показатели** в условиях ограниченного пространства в на судне являются достаточно существенным критерием при окончательном выборе той или иной установки. К основным показателям этой группы можно отнести массу и площадь, занимаемую оборудованием. Например, для упомянутой выше установки The Hyde GUARDIAN® Ballast Water Treatment System сухая масса всего оборудования может достигать 8–20 т для высокопроизводительных моделей (рис. 6).

Анализ массогабаритных показателей оборудования для обработки балласта разных производителей показал, что полная площадь, занимаемая установкой в машинном отделении, составляет 0,3–30 м<sup>2</sup> при производительности 200 м<sup>3</sup>/ч и 1–145 м<sup>2</sup> при производительности 2000 м<sup>3</sup>/ч, усредненное же значение для установок указанной производительности составляет 7 и 21 м<sup>2</sup>, соответственно. Применяемые технологии существенно влияют на занимаемую площадь, например, это значение при производительности 200 м<sup>3</sup>/ч составляет 25 м<sup>2</sup> для оборудования компании ATG UV TECHNOLOGY (ультрафиолетовая обработка), 6,8 м<sup>2</sup> – для Ecochlor Inc (химическая

обработка соединениями хлора) и 3 м<sup>2</sup> – для Electricchlor Inc (электрохимическая обработка). Высота смонтированной установки также колеблется в широком диапазоне – от 1 до 20 м (усредненное значение составляет порядка 3 м).

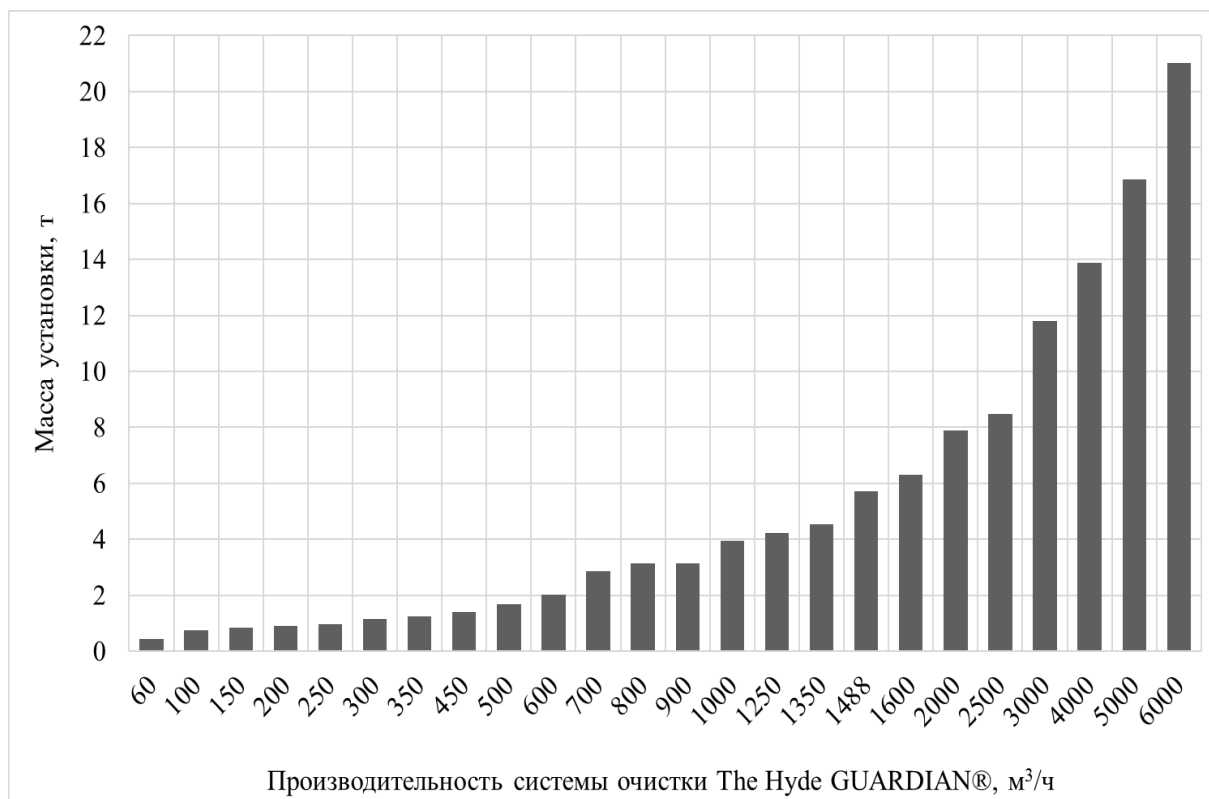


Рис. 6 – Зависимость массы оборудования от производительности системы обработки балласта с использованием технологии «фильтрация + ультрафиолетовое облучение»

Основными **экономическими показателями** являются капитальные и эксплуатационные затраты. Анализ данных, предоставляемых разными производителями, показал, что капитальные вложения колеблются в диапазоне 20–600 тыс. долл. США при производительности 200 м<sup>3</sup>/ч и 50–2000 тыс. долл. США при производительности 2000 м<sup>3</sup>/ч, усредненное же значение для установок указанной производительности составляет 281 и 863 тыс. долл. США, соответственно. Средние эксплуатационные затраты составляют 39 долл. США на 1000 м<sup>3</sup> обработанного балласта и, в зависимости от применяемых технологий, могут как отсутствовать, так и достигать 220 долл. США на каждые 1000 м<sup>3</sup> обработанного балласта.

**Показатели безопасности** особенно актуальны при использовании химических или физико-химических технологий обработки балласта в установках. Необходимо учитывать возможное негативное влияние на здоровье и жизни экипажа, в т.ч. и последствия ультразвукового воздействия или ультрафиолетового облучения при использовании соответствующих технологий. При выборе оборудования следует обратить внимание на его взрывобезопасность (особенно для танкеров или газовозов).

Если в установке используется химическая обработка, на судне хранится запас реагентов, которые могут представлять опасность для команды и/или окружающей среды. Некоторые вещества образуются непосредственно на судне в качестве побочных продуктов химических или электрохимических реакций. В этом случае команда должна пройти соответствующую подготовку по использованию и хранению таких веществ в судовых условиях.

В помещениях для хранения должны соблюдаться специальные требования по вентиляции и пожарной безопасности. Персонал должен пройти специальную подготовку по отработке действий в случае пожара или утечки химических веществ, применяемых или образующихся в системе обработки балласта. В этом случае основным нормативным

документом является «Руководство по обеспечению безопасного использования и хранения химических веществ и препаратов, используемых при обработке балластных вод, и разработка процедур безопасности по снижению рисков для судна и экипажа в результате процесса обработки», разработанное ИМО в дополнение к «Конвенции по контролю и управлению балластными водами и осадками». Дополнительные процедуры безопасности должны предусматриваться и на случай попадания опасных газообразных веществ в балластные цистерны.

Несмотря на относительно невысокие мощностные, массогабаритные и стоимостные показатели установок, использующих химические технологии обработки, их существенным недостатком являются повышенные требования к экологической безопасности и безопасности для экипажа, вопрос утилизации образующихся осадков, а также необходимость наличия специально оборудованного помещения для хранения химических реагентов.

**Выводы.** Обоснованы и детально рассмотрены базовые технико-экономические показатели установок обработки балласта: надёжности, энергоэффективности, экономические, массогабаритные, безопасности. Выделены количественные и качественные показатели, характеризующие надёжность установок с учетом применяемых технологий: наличие сертификата, необходимая производительность, условия применения, время до полной гибели микроорганизмов, коррозионное воздействие. Установлено, что из-за длительного времени поражающего воздействия некоторые технологии неприменимы на судах с небольшой длительностью рейса (до 6 суток). Недостатком других технологий является усложнение схем балластных систем и коррозионная агрессивность.

Показано, что увеличение энергетических затрат, связанное с установкой оборудования обработки балласта, в зависимости от применяемых технологий, может вызывать необходимость установки дополнительного стояночного дизель-генератора или замены существующего на более мощный. Масса отдельных установок и занимаемая ими на судне площадь может достигать 20 т и 145 м<sup>2</sup>, соответственно, при высоте до 20 м. Дополнительные капитальные затраты могут составлять до 2 млн. долл. США (в отдельных случаях и больше), т.е. достигать нескольких процентов от полной стоимости судна, стоимость обработки может составлять от 40 до 220 долл. США за каждые 1000 м<sup>3</sup> балласта.

**Дальнейшие исследования** будут связаны с разработкой комплексного многофакторного показателя эффективности установок обработки балласта, который будет учитывать как количественные, так и качественные технико-экономические показатели и разработкой рекомендаций по выбору рационального состава и параметров систем обработки балласта, в зависимости от типа и района плавания судна.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбов В. М. Суднова енергетика та Світовий океан [Текст]: підручник / В. М. Горбов, І. О. Ратушняк, С. І. Трушляков, О. К. Чередниченко. – Миколаїв : НУК, 2007. – 596 с.
2. Ballast Water Treatment Advisory [Electronic resource]. – Houston: American Bureau of Shipping, 2011. – Mode of access : <http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/References/ABS%20Advisories/BWTreatmentAdv>.
3. Guide to ballast water treatment systems [Electronic resource]. – Colorado : IHS Maritime, 2013. – Mode of access : <http://www.rwo.de/rwo/ressources/documents/1/25412,Ballast-Water-Guide-2013.pdf>.
4. Ballast water treatment systems. Guidance for ship operators on procurement, installation and operation [Electronic resource]. – London : Lloyd's Register, 2010. – Mode of access : <http://www.cnss.com.cn/uploadfile/2014/0109/20140109093334177.pdf>.
5. Guide for ballast water treatment [Electronic resource]. – Houston : American Bureau of Shipping, 2011. – Mode of access : [http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/187\\_BWT/Guide](http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/187_BWT/Guide).

6. National ballast water management requirements [Electronic resource]. – London : Lloyd's Register Marine, 2014. – Mode of access : [http://www.lr.org/en/\\_images/213-35818\\_National\\_ballast\\_water\\_management\\_requirements\\_January\\_2014\\_V3\\_tcm155-175149.pdf](http://www.lr.org/en/_images/213-35818_National_ballast_water_management_requirements_January_2014_V3_tcm155-175149.pdf).
7. Сустрєтова Н. В. Обеспечение экологической безопасности балластных вод на судах смешанного «река–море» плавания [Текст]: диссертация кандидата технических наук: 03.02.08 / Н. В. Сустрєтова. – Нижний Новгород, 2011. – 140 с.
8. Swanson L. Shipboard Demonstrations of Ballast Water Treatment to Control Aquatic Invasive Species / L. Swanson, T. Perlich [Electronic resource]. – Honolulu : Matson Navigation Company, 2014 – Mode of access : [http://www.matson.com/corporate/pdf/ballast\\_water\\_management-Swanson-Perlich.pdf](http://www.matson.com/corporate/pdf/ballast_water_management-Swanson-Perlich.pdf).
9. Cosman J. Validation Protocol for Performance Testing and Scaling Ballast Water Treatment Systems Employing UV Disinfection and Filtration / J. Cosman, J. Fraser, G. Latimer, J. Gerardi-Fraser [Electronic resource]. – London : Trojan Technologies, 2012. – Mode of access : [http://nsf.kavi.com/apps/group\\_public/download.php/8169/Trojan%20Scaling%20BWTs%20Systems%20Employing%20Filtration%20and%20UV.pdf](http://nsf.kavi.com/apps/group_public/download.php/8169/Trojan%20Scaling%20BWTs%20Systems%20Employing%20Filtration%20and%20UV.pdf).
10. Flower J. On continuous-flow techniques for the purging of contaminated water in ballast water tanks [Text] / J. Flower // Journal of Marine Engineering and Technology. – 2002. – № A1. – P. 37-47.
11. Yongxin Song Corrosion of marine carbon steel by electrochemically treated ballast water [Text] / Yongxin Song, Kun Dang, Huafang Chi, Delin Guan // Journal of Marine Engineering and Technology. – 2009. – № A13. – P. 49-55.
12. Monzingo D. G. Ballast Water Treatment System Evaluation for Small Vessels (Prepared for Isle Royale National Park) [Text] / D. G. Monzingo, K. J. Reynolds, R. J. Van Slyke. – Washington : The Glosten Associates, 2011. – 54 p.
13. Australian Ballast Water Management Requirements [Electronic resource]. – Canberra Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, 2013. – Mode of access : <http://www.environment.gov.au/system/files/pages/b3041c7c-eecb-4d39-b4d0-a089a1d60adc/files/co51australianbwrequirements.pdf>.
14. Rules for Classification and Construction Germanischer Lloyd. VI Additional Rules and Guidelines. 11 Other Operations. Guidelines on Ballast Water Management [Electronic resource]. – Hamburg : Germanischer Lloyd, 2001. – Mode of access : [http://www.gl-group.com/infoServices/rules/pdfs/gl\\_vi-11-10\\_e.pdf](http://www.gl-group.com/infoServices/rules/pdfs/gl_vi-11-10_e.pdf).
15. Голубев Н. В. Проектирование энергетических установок морских судов [Текст] : учебное пособие / Н. В. Голубев. – Л. : Судостроение, 1980. – 312 с.
16. Артемов Г. А. системы судовых энергетических установок [Текст] : учебное пособие / Г. А. Артемов, В. П. Волошин, А. Я. Шквар, В. П. Шостак. – Л. : Судостроение, 1990. – 376 с.
17. Артемов Г. А. Суднові енергетичні установки [Текст] : навчальний посібник / Г. А. Артемов, В.М. Горбов – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – 356 с.

**Горбов В.М., Мітєнкова В.С. АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПІД ЧАС ВИБОРУ СИСТЕМ ОБРОБКИ БАЛАСТУ**

*У даній статті виконаний аналіз техніко-економічних показників, що визначають ефективність устаткування обробки балластних вод. Основною метою дослідження було обґрунтування характеристик, необхідних для раціонального вибору установок бортової обробки баласту під час проектування нових суден або модернізації існуючих. Враховуючи різноманіття доступних на ринку установок очистки баласту, для остаточного проектного рішення необхідно використовувати методи техніко-економічного та статистичного аналізу великої кількості показників. У статті наведені якісні параметри, які необхідно враховувати під час вибору технологічних схем обробки. Було визначено діапазони зміни масогабаритних показників, значень споживаної установками потужності, капітальних і експлуатаційних витрат. Виділено основні можливі фактори негативного впливу на навколишнє середовище і безпеку екіпажу з боку обладнання обробки баласту. Аналіз цих параметрів дасть можливість обґрунтувати раціональні технічні рішення*

на стадії концептуального проектування суден і розробити комплексний показник ефективності установок обробки баласту.

**Ключові слова:** обробка баласту, техніко-економічні показники, споживна потужність, масогабаритні характеристики, ультрафіолетова обробка, електроліз, фільтрація хлорування.

**Gorbov V.M., Mitienkova V.S. ANALYSIS OF TECHNICAL-AND-ECONOMIC INDEXES ESSENTIAL FOR CHOICE OF BALLAST WATER TREATMENT PLANTS**

*The article reveals technical-and-economic indexes which determine efficiency of equipment for ballast water treatment. The main aim of the research is to define the parameters essential for rational choice of onboard ballast water treatment during new ship design or re-equipment of the available ships. The author emphasizes that methods of technical-and-economic and statistical analysis of numerous indexes should be used, considering loads of commercially available plants for ballast water treatment. The article shows technological diagrams of ballast treatment where qualitative characteristics are considered. Ranges of weight-size parameters, plants power consumption, capital and operation costs changes are determined. The author points out the major possible factors of negative impact on environment and crew's safety with regards to plants for ballast water treatment. Analysis of these indexes provides an opportunity to define rational engineering solutions at the stage of conceptual ship design and work out integrated index of effectiveness for ballast water treatment plants.*

**Keywords:** ballast treatment, technical-and-economic indexes, power consumption, weight-size parameters, UV treatment, electrolysis, filtration, chlorination.

© Горбов В.М., Мітєнкова В.С.

Статтю прийнято  
до редакції 27.10.14

УДК 628.517.2:629.122

## УПРАВЛЕНИЕ СНИЖЕНИЕМ УРОВНЕЙ ВИБРАЦИИ И ШУМА, ОРГАНИЗАЦИЯ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ И ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ НА МОРСКИХ СУДАХ

*Гусев В.Н.*

*Херсонская государственная морская академия*

*В работе показано, какую серьезную опасность воздействия на человека оказывает вибрация, проведен анализ основных источников шума на морском судне, приведены некоторые мероприятия по снижению уровня шума на судне. Исследования в работе проводилось по двум направлениям – снижение шума в самом источнике и ослабление звуковой энергии, распространяющейся по воздуху и конструкциям корпуса, на основе применения системы автоматического управления (САУ) и разработка средств звукопоглощения, которые практически могут быть использованы в виде звукоизолирующих ограждений, звукоизолирующих кабин и пультов управления, звукоизолирующих кожухов и акустических экранов. В первом направлении исследования – автоматическом управлении снижения вибрации (шума) в источнике – рассмотрены задачи анализа и синтеза. Приведен критерий качества, который одновременно является характеристикой вибрации гибких механических конструкций. В результате разработанной САУ вибрацией композитных конструкций и нового метода ее синтеза под внешней динамической нагрузкой, с целью снижения уровней вибрационного ускорения в широкой полосе низких частот удалось снизить вибрацию по всей поверхности гибкой механической конструкции. Второе направление исследования с различным составом бариево-боратного пеностекла показало его возможность использовать как звукопоглощающий материал.*

**Ключевые слова:** *вибрация, шум, автоматическая система управления, гибкая механическая конструкция, бариево-боратное пеностекло.*

**Введение.** В морских документах [1, 2] сказано, что на постоянной основе должны проводиться исследования по проблеме вибрации (шума) на борту судов с целью улучшения защиты моряков от неблагоприятных последствий воздействия вибрации (шума). Следовательно, выбор мероприятий по уменьшению вибрации (шума) на борту судов является актуальным.

Строго определения вибрации в настоящее время нет. В английском языке vibration – эквивалент понятия механических колебаний. Вибрация – колебание твердых тел. О вибрации также говорят в более узком смысле, подразумевая механические колебания, оказывающие ощутимое влияние на человека. Установлено, что вибрации при частотах: 75–120 Гц с амплитудой 0,01 мм не ощущаются; 60–75 Гц с амплитудой 0,01–0,02 мм отвлекают от работы и раздражают; 50–65 Гц с амплитудой 0,02–0,03 мм являются сильным препятствием в работе; 50–65 Гц с амплитудой более 0,03 мм создают невозможные условия для работы. Вибрация выше 63 Гц воспринимается как шум.

Серьезную опасность представляет воздействие на человека общей и комбинированной вибрации в частотном диапазоне 4–30 Гц (т.е. в низкочастотном диапазоне), что объясняется возможностью совпадения собственных частот колебаний органов и частей тела с частотой виброколебаний.

Очевидно, деление на вибрацию и шум условно. Границы судовой вибрации и шума – 1,4 до 11000 Гц [3].

Различные механические, аэродинамические и электромагнитные явления являются причиной возникновения шумов. Механические шумы возникают при работе различных машин и механизмов и вызваны трением и соударениями составляющих их деталей, ударными процессами и рядом других факторов. Источниками шума на судах являются главные двигатели, вспомогательные дизель генераторы, системы вентиляции машинно-котельных отделений, жилых и служебных помещений, рефустановки, технологическое оборудование, движители судна, гребные винты, водяные системы бытового обслуживания, лифты, лебёдки, промысловые механизмы, грузовые краны, удары волн и льда о корпус судна, звуковые сигналы и т.п.

Аэродинамические и гидродинамические шумы возникают при течении газов и жидкостей. Электромагнитные шумы обычно сопровождают работу различных электрических установок. К категории таких источников шума следует отнести навигационные приборы, шум которых является серьёзной помехой в помещениях ходового мостика. Природа этого шума – переменные электромагнитные процессы, создаваемые электрическими машинами-сельсинами.

На любом судне шум от его источников (машинно-котельное отделение и т.д.) распространяется по воздуху – воздушный шум и по корпусным конструкциям судна в виде звуковой вибрации – структурный шум. Воздушный шум может проникать в жилые и служебные помещения через переборки, палубы, подволоки, по вентиляционным каналам, через различные отверстия (капы, люки, иллюминаторы) и т.д.

Распространение структурного шума происходит через фундаменты и различные не опорные связи (например, трубопроводы) на корпусные конструкции судна. Достигая ограждающих конструкций помещений, он вызывает их вибрацию, которая, в свою очередь, вызывает упругие колебания воздуха, воспринимаемые уже как воздушный шум.

Гребные винты являются источниками воздушного и структурного шума, которые особенно ощущаются в корме судна.

Снижение механических шумов достигается: улучшением конструкции машин и механизмов, заменой деталей из металлических материалов на пластмассовые, применением вместо зубчатых передач в машинах и механизмах других видов передач (например, клиноременных) или использованием зубчатых передач, не издающих громких звуков (например, при использовании не прямозубых, а косозубых или шевронных шестерен), нанесением смазки на трущиеся детали и рядом других мероприятий. Эффективность некоторых из перечисленных мероприятий по снижению уровня шума представлена ниже [4]:

Мероприятия	Снижение уровня шума, дБ
Замена прямозубых шестерен шевронными	5
Замена зубчатой передачи на клиноременную	10–15
Замена металлических корпусов машин на пластмассовые:	
в области высоких частот	7–15
в области средних частот	2–6

Для уменьшения аэродинамических и гидродинамических шумов рекомендуются снижение скорости обтекания газовыми или воздушными потоками препятствий, улучшение аэродинамики тел, работающих в контакте с потоками; снижение скорости истечения газовой струи и уменьшение диаметра отверстия, из которого эта струя истекает; выбор оптимальных режимов работы насосов для перекачивания жидкостей; правильное проектирование и эксплуатация гидросистем и ряд других мероприятий.

Для борьбы с шумами электромагнитного происхождения рекомендуется тщательно уравнивать вращающиеся детали электромашин (ротор, подшипники), осуществлять тщательную притирку щеток электродвигателей, применять плотную прессовку пакетов трансформаторов и т.д.

Наиболее рациональный способ уменьшения шума – уменьшение шума в источнике его возникновения. На сегодняшний день разработка методов и алгоритмов снижения структурной вибрации и шума в широкой полосе низких частот является актуальной.

Наряду с традиционными средствами снижения шума и вибрации перспективным методом снижения вибрации и шума в диапазоне низких частот является управление вибрационными и акустическими характеристиками, например, гибкой механической конструкции.

Исходя из вышесказанного, **целью работы** является разработка методов снижения уровней вибрации (шума) на основе управления снижением уровней вибрации и шума гибких механических конструкций на судне, организация звукопоглощения и звукоизоляции путем экспериментального подбора образцов, снижающих шум на различных частотах до уровня близкого к медицинским требованиям.

Таким образом, борьба с шумом в данной работе будет проводиться в двух направлениях – снижение шума в самом источнике и ослабление звуковой энергии, распространяющейся по воздуху и конструкциям корпуса на основе применения системы автоматического управления (САУ) и разработка средств звукопоглощения, которые практически могут быть использованы в виде звукоизолирующих ограждений, звукоизолирующих кабин и пультов управления, звукоизолирующих кожухов и акустических экранов.

Первый путь наиболее эффективный, но и наиболее сложный. Этот путь должен решаться на стадии проектирования и строительства судна и механизмов для него.

Из физики: звукопоглощение отличается от звукоизоляции главным образом тем, что звукоизоляция удерживает звуковые волны внутри помещения, не выпуская их за его пределы, а звукопоглощение предотвращает отражение звука от стен помещения.

Перейдем к рассмотрению первого направления данной работы по снижению вибрации (шума) в источнике.

В теории автоматического управления можно выделить две характерные задачи:

- 1) в заданной САУ найти и оценить переходные процессы – это задача анализа;
- 2) по заданным переходным процессам и основным показателям разработать САУ – это задача синтеза.

**Постановка первой задачи.** Задача синтеза сложнее задачи анализа из-за своей неоднозначности, поэтому задачу синтеза САУ ставят ограниченно.

Под синтезом системы автоматического управления понимается направленный расчет, имеющий конечной целью отыскание рациональной структуры системы и установление оптимальных величин параметров ее отдельных звеньев.

Синтез параметров системы заданной структуры и синтез корректирующих устройств системы по заданным показателям качества рассматривают как инженерную задачу, сводящуюся к такому построению САУ, при котором обеспечивается выполнение технических требований.

В настоящее время разработаны эффективные методы синтеза управления. Под управлением в работе будем понимать процесс организации такого целенаправленного воздействия на объект, в результате которого объект переходит в требуемое (целевое) состояние, при этом рассматривать управление такими объектами, поведение которых удастся описать формально, т.е. используя математический аппарат.

**Объектом управления** в работе выберем гибкую механическую конструкцию на судне (например, металлическую мачту для установки антенны радара на мостике судна или мачту для топовых огней) и, обозначив по сценарию [5] на рис. 1  $X$  – состояние ее среды, а  $Y$  – состояние гибкой механической конструкции, определяемая скоростью колебания, получим, в этом случае, что состояние объекта  $Y$  будет зависеть от состояния его среды, т.е. между ними имеется какая-то связь.



Рис. 1 – Взаимодействие объекта со средой

Графическое изображение на рис. 1 можно представить в виде формулы

$$Y = F(X),$$

где  $F$  – функция между так называемым входом и выходом гибкой механической конструкции.

Поскольку в работе целенаправленно ставится вопрос о процессе управления объектом, то источник выполнения – субъект. Выделим субъект в той среде, что и объект, тем самым субъект воспринимает состояние  $X$  среды и одновременно на него влияет состояние  $Y$  объекта, рис. 2.

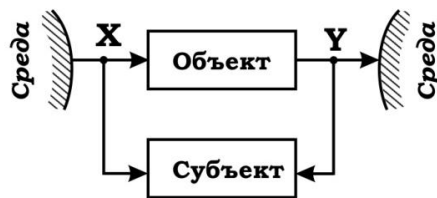


Рис. 2 – Схема взаимодействия субъекта со средой и объектом

В данном случае если состояние субъекта (его колебания, имеется в виду гибкой механической конструкции) не устраивает его, то необходимо организовать такое воздействие на объект, которое приведет его в новое состояние (например, уменьшится амплитуда колебаний), удовлетворяющее субъекта. Это воздействие и есть управление. Поэтому один из «принципов» управления сводится к неудовлетворенности субъекта, сложившейся в объекте. Отметим, что для управления объектом необходимо провести исследования самого объекта (его колебания, которые образуют вибрацию (шум), возможно моделирование шума и вибрации типовыми гибкими механическими конструкциями), провести синтез его модели, выработки управления и реализации его и т.д. Именно, как это указывалось выше, к управлению обращаются в исключительных случаях. В данной работе субъект идет на создание системы управления, а для такого случая субъекту определено, каким образом можно воздействовать на объект (например, замена металла композитными материалами), т.е. определить каналы управления. Обозначим это управление  $U$ . Тогда состояние объекта управления будет зависеть от двух факторов – состояние среды  $X$  и состояния  $U$ :

$$Y = F(X, U).$$

Общую систему управления можно представить в виде, рис. 3.

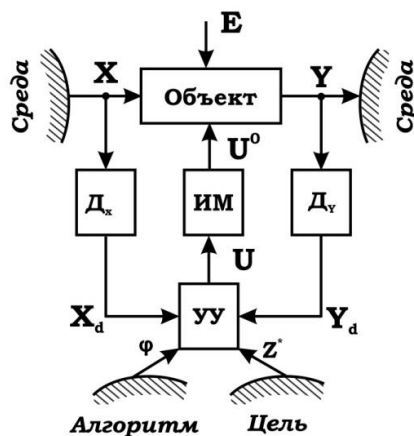


Рис. 3 – Схема системы управления:

$X$  – наблюдаемый вход, управляемый, действительное состояние;  $E$  – ненаблюдаемый вход;  $U^o$  – наблюдаемый вход, управляемый;  $ИМ$  – исполнительные механизмы;  $УУ$  – управляющее устройство;  $D_x$  и  $D_y$  – датчики, с помощью которых измеряется состояние среды и объекта, соответственно;  $X_d$  – показание датчика;  $Y_d$  – показание датчика;  $\varphi$  – алгоритм управления;  $Z^*$  – цель управления.

Отметим, что результаты измерений

$$X_d = D_x(X); Y_d = D_d(Y),$$

где  $D_x$  и  $D_y$  – операторы датчиков, являются исходной информацией для управляющего устройства  $УУ$ .

Эти формулы выражают очевидную связь между состоянием (среды или объекта) и информацией об этом состоянии.

Таким образом, в основе процесса управления лежит информация о сложившейся ситуации:

$$I = (X_d, Y_d).$$

Следовательно, основными факторами всякого управления, которые присущи любой системе управления объектом, являются:

- цель управления –  $Z^*$ ;
- информация о состоянии объекта и среды –  $I$ ;
- воздействие на объект, т.е. собственно управление –  $U$ ;
- алгоритм управления –  $\varphi$ .

**Основное содержание.** Проанализировав методы исследований вибрационных и акустических характеристик гибких механических конструкций и определив параметры, проводится их управление, т.е. ставится задача синтеза САУ виброакустическим излучением, которое заключается в компенсации внешней динамической нагрузки  $d$ , рис. 4.

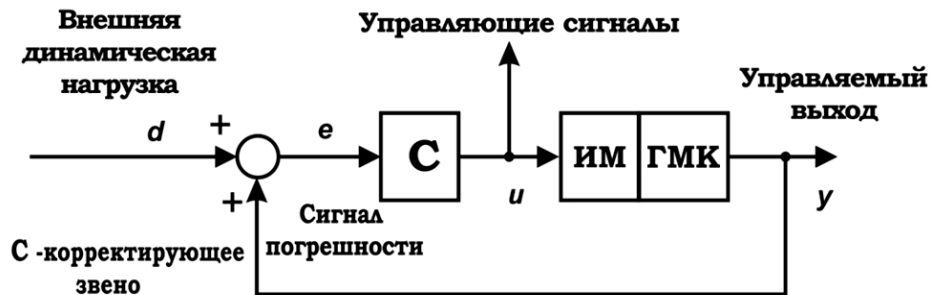


Рис. 4 – Схема САУ по сигналу отклонения виброускорения: ИМ – исполнительный механизм; ГМК – гибкая механическая конструкция

В случае, когда САУ синтезируется для снижения вибрации в отдельной точке на поверхности гибких механических конструкций, целью синтеза САУ является увеличение критерия качества, определяемого в нашей работе [6] как

$$F_{obj} = 20 \lg \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{d}{e} df.$$

при обеспечении запаса стойкости с амплитудой в 10 дБ.

Критерий качества одновременно является характеристикой вибрации или шума гибких механических конструкций. Управление гибкими конструкциями проводилось с помощью активных, пассивных и комбинированных методов снижения вибрации и шума на низких частотах, которые позволили повысить динамическое качество конструкций разного назначения в условиях усложненных действий возмущений.

Задача активной компенсации внешней динамической нагрузки заключалась в определении оптимального размещения компенсированного устройства на гибких механических конструкциях. В управлении внешними динамическими нагрузками определялись оптимальные зависимости амплитуд и фаз компенсированных сил или моментов, которые создаются исполняющими устройствами, от частоты. При управлении по отклонениям сигнала погрешности, которые связаны с вибрацией или акустической характеристикой изотропных или композитных гибких механических конструкций, определялись оптимальные параметры перед дополнительной функцией управляемого звена. Задача пассивной компенсации внешней динамической нагрузки заключалась в определении оптимальных размещений и величин дополнительных масс на поверхности гибких механических конструкций. В результате разработанной САУ вибрацией композитных конструкций и нового метода ее синтеза под внешней динамической нагрузкой с целью снижения уровней вибрационного ускорения в широкой полосе низких частот удалось снизить вибрацию по всей поверхности гибкой механической конструкции.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения разработанного метода. Полученное снижение виброускорения в отдельной точке изотропной конструкции составило 6,6 дБ, для ортотропной конструкции – 1,9 дБ, для виброскорости по всей поверхности конструкции 5,5 дБ.

Второе направление работы – экспериментальная часть, в которой в качестве выбора звукопоглощающего материала, с целью дальнейшего внедрения на судах, были проведены исследования с материалом на основе бариево-боратного пеностекла (ББП).

В работе при проведении эксперимента по изучению защитных свойств ББП использовали четыре образца пеностекла: беспримесное бариево-боратное пеностекло; бариево-боратное пеностекло с примесью ионов титана, бариево-боратное пеностекло с примесью ионов меди; бариево-боратное пеностекло с примесью кремния.

В процессе изготовления ББП получали состав с равномерно расположенными порами по всему объему с диаметром  $d \sim 1$  мм. Пористость всех бариево-боратных пеностекел составляла  $\Pi = 0,9999$  отн. ед. Толщина бариево-боратного пеностекла во всех случаях была равна – 5 мм.

Для проведения эксперимента по звукопоглощению пеностекла была создана на кафедре БЖД ХГМА установка, схема которой представлена на рис. 1.

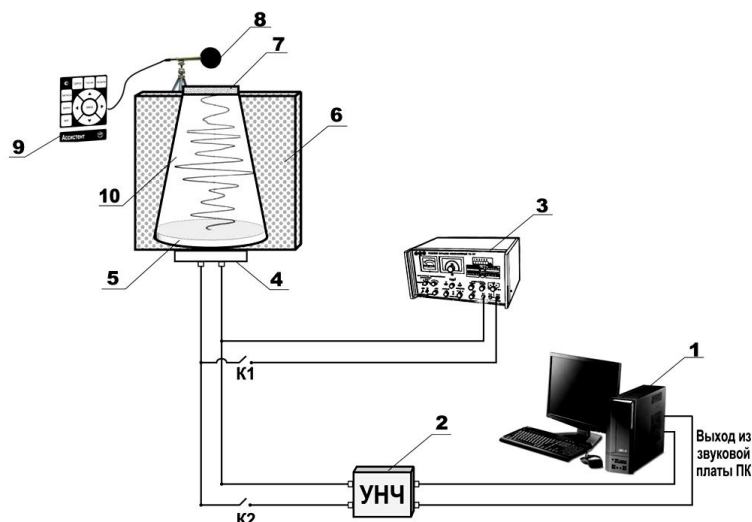


Рис. 5 – Схема установки по исследованию звукопоглощения пеностекла:

1 – компьютер как генератор сигналов; 2 – усилитель низкой частоты; 3 – генератор сигналов низкочастотный ГЗ-117; 4 – динамическая головка; 5 – диффузор динамика; 6 – звукоизолирующий кожух, ящик; 7 – исследуемый образец; 8 – микрофон измерительного прибора; 9 – измерительный прибор – Ассистент; 10 – коническая поверхность, в которой сосредоточены звуковые волны; к1 – к2 – выключатель, выключатель

Методика проведення досліджень зводиться до задання однієї частоти звукових хвиль на конічній поверхні установки з допомогою комп'ютера по заданій програмі або з допомогою генератора сигналів низькочастотного ГЗ-117.

Вимірювання рівня шуму на різних частотах, що пройшли через зразки пеностекла, проводиться приладом Ассистент. В табл. 1 наведені результати вимірювань рівня шуму в дБА на різних частотах з допомогою ГЗ-117.

Таблиця 1 – Рівень шуму на різних частотах

1/1 октави, Гц		<i>E<sub>q</sub></i>				
		Значення, дБА				
		Без пеностекла	С пеностеклом без приміси	Пеностекло +Si	Пеностекло +Ti	Пеностекло +Cu
S	31,5	41,3	39,7	40,9	42,5	41
	63,0	57,3	46,1	46,3	47,8	45,9
	125,0	61,7	52,3	52,5	52,9	51,3
	250,0	69,1	59,3	59,3	60,1	58,2
	500,0	70,8	59,9	57,7	59,1	58
	1000,0	74,7	66,3	64,9	67,1	62,6
	2000,0	78,6	60,5	55,5	60,6	56
	4000,0	83,5	59,1	53	59,9	51,3

Згідно отриманим даним, вказаним в табл. 1, застосування пеностекла дозволяє знизити рівень шуму в середньому на 12 дБ по всьому діапазону частот, а максимум ефективності спостерігається на високих частотах, де рівень зниження шуму становить більше 20 дБ. Іони Si, Ti, Cu в складі пеностекла значно покращили звукопоглинаючі властивості піно матеріалу. Більш ефективними властивостями звукопоглинання володіє склад з домішкою іонів міді.

**Висновок.** В роботі, з однієї сторони, проводиться заходи по розробці методу підвищення динамічного якості управління гнучкими механічними конструкціями, які вібрирують під впливом зовнішньої динамічної навантаження на основі автоматичного зниження рівня вібрації і акустичного випромінювання, з іншої сторони, проводиться експериментальне дослідження по вибору звукопоглинаючого матеріалу з метою подальшого впровадження на судах.

**Висновки.** В результаті проведеного першого заходу отримане зниження віброшвидкості в окремій точці ізотропної конструкції становило 6,6 дБ, для ортотропної конструкції – 1,9 дБ, для віброшвидкості по всій поверхні конструкції – 5,5 дБ.

В результаті другого – застосування пеностекла дозволило знизити рівень шуму в середньому на 12 дБ по всьому діапазону частот, а максимум ефективності спостерігалося на високих частотах, де рівень зниження шуму становив більше 20 дБ.

Дальніші дослідження в лабораторії кафедри БЖД ХГМА будуть проведені з метою розробки САУ для зниження вібрації (шуму) нових об'єктів на судні, а також продовження пошуку нових звукопоглинаючих матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Конвенція про працю в морському судноходстві (КТМС) № 186 (англ. : Maritime Labor Convention (MLC) 2006/2013) Maritime Labour Convention (MLC 2006/2013).
2. Кодекс безпечної практики роботи для моряків торгових судів Code of Safe Working Practices for Merchant Seamen (COSWP 2010).
3. Барановський А. М. Урівноваження і віброзахист механізмів : курс лекцій / А. М. Барановський. – Новосибірськ : НГавт. 2006. – 131 с.
4. Екологія і безпека життєдіяльності / Д. А. Кривошеїн, Л. А. Муравей і др. – М. : Юніті-Дана, 2000. – 447 с.

5. Растригин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растригин. – М. : Сов. Радио, 1980. – 232 с.

6. Гусев В. Н., Селиванов С. Е., Макаренко В. Н., Токарев В. И. Материалы Всеукраинской научно-практической конференции «Безопасность труда: образование, наука, практика», 20 ноября 2014 г., НУГЗУ. – Харьков. – С. 39-41.

**Гусев В.М. УПРАВЛІННЯ ЗНИЖЕННЯМ РІВНЯ ВІБРАЦІЙ І ШУМУ, ОРГАНІЗАЦІЯ ЗВУКОПОГЛИНАННЯ І ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ НА МОРСЬКИХ СУДНАХ**

*У роботі показано, яку серйозну небезпеку впливу на людину робить вібрація, проведено аналіз основних джерел шуму на морському судні, наведені деякі заходи щодо зниження рівня шуму на судні. Дослідження в роботі проводилось за двома напрямками – зниження шуму в самому джерелі і ослаблення звукової енергії, що поширюється повітрям і конструкціями корпусу на основі застосування системи автоматичного керування (САУ) і розробкою засобів звукопоглинання, яке практично може бути використано у вигляді звукоізолюючих огорожень, звукоізолюючих кабін і пультів управління, звукоізолюючих кожухів і акустичних екранів. У першому напрямку дослідження – автоматичному управлінні зниження вібрації (шуму) в джерелі розглянуті задачі аналізу і синтезу. Наведено критерій якості, який одночасно є характеристикою вібрації гнучких механічних конструкцій. В результаті розробленої САУ вібрацією композитних конструкцій і нового методу її синтезу під зовнішнім динамічним навантаженням з метою зниження рівнів вібраційного прискорення в широкій смузі низьких частот вдалося знизити вібрацію по всій поверхні гнучкої механічної конструкції. Другий напрям: дослідження з різним складом барієво-боратного піноскла показало його можливість використовувати як звуковбирний матеріал.*

**Ключові слова:** вібрація, шум, автоматична система управління, гнучка механічна конструкція, барієво-боратне піноскло.

**Gusev V.N. VIBRATION AND NOISE REDUCTION MANAGEMENT, ABSORPTION AND SOUNDPROOFING ORGANIZATION ON MARINE VESSELS**

*The paper discloses the human risk to vibration exposure and provides analysis of the main sources of noise on the ship. It also shows some measures to reduce the noise level on the ship. The research was conducted in two areas - noise reduction at the source and soundproofing of acoustic energy propagating through the air and the hull structure based on the application of automatic control system (ACS) and development of absorption means, which can be practically used as soundproof barriers, soundproof booths and control panels and acoustic screens. In the first direction of research automatic control of vibration reduction (noise) in the source, problems of analysis and synthesis are considered. A criterion of quality, which is also the vibration characteristic of flexible mechanical structures, is presented. Due to ACS development by the vibration of composite structures and a new method of its synthesis under external dynamic load, the vibration of the entire surface of the flexible mechanical structure was reduced. The second direction of investigation of different composition barium borate foam glass has shown its ability to be used as absorption material.*

**Keywords:** vibration, noise, automatic control system, a flexible mechanical design, barium borate foam glass.

© Гусев В.М.

Статтю прийнято  
до редакції 18.11.14

УДК 629.12.066(076)

## ОЦЕНИВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВЫХ ДВС

*Исаев Е.А., Симаненков А.Л.*

*Херсонская государственная морская академия*

*Статья рассматривает проблематику настройки параметров работы системы контроля и диагностирования динамических характеристик судового двигателя внутреннего сгорания, двухтактного шестицилиндрового ДВС типа WARTSILA-SULCER 6 RT-flex 50b. На примере кривых изменения значений температуры выпускных газов судового ДВС во время изменения условий внешней среды, показано влияние значений гарантированного и контрольного допусков на принятие системой мониторинга решения, об управляющем воздействии на объект регулирования (ДВС). Статья преследует цель, аналитическим методом показать влияние ошибок первого и второго уровней на работу автоматической системы слежения и управления, во время изменения условий внешней среды. Целью статьи является доказательство важности просчета и исследования влияний указанных допусков, а так же шумов измерения во время моделирования и выбора критериев оценивания работы системы измерения и контроля параметров работы судовых ДВС.*

**Ключевые слова:** *система контроля и диагностирования параметров судового ДВС, гарантированный допуск, контрольный допуск, ошибка измерения.*

**Анализ проблемы.** В связи с непрерывным ростом автоматизации судовых узлов и механизмов, важной становится проблема нового комплексного подхода к обеспечению нужной эффективности функционирования оборудования, сосредотачивающего в себе решение проблем, связанных с проектированием, эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом оборудования. Решением упомянутых проблем в отрасли судоходства может послужить подход, предлагаемый теротехнологией [1].

Теротехнология – технология обеспечения эффективного функционирования агрегатов и оборудования на протяжении всего срока службы с учетом технологических, технических и организационных факторов, а так же взаимосвязей между ними, основана на непрерывном выявлении и устранении причин, которые уменьшают эффективность функционирования.

Важным фактором теротехнологии является уровень эксплуатации и управления оборудованием, зависящий от поддержания режимов технической эксплуатации, ее правил и соответствия технических характеристик оборудования внешним условиям его эксплуатации.

Поскольку нормальное функционирование оборудования невозможно из-за частых аварий, в задачу теротехнологического подхода включена разработка как организационных, так и технологических мер, которые направлены на предотвращение аварий. К ряду таким мероприятий относят повышение уровня механизации и автоматизации судового оборудования; повышение квалификационного уровня судовых экипажей (обслуживающего персонала); строгое соответствие со стандартными условиями ремонта судовых энергетических установок; учет человеческого фактора во время работы суден.

При помощи методов технической диагностики предусматривают возможные отклонения во время работы установок, аппаратов и оборудования, а так же разрабатываются методы выявления и локализации неисправностей в системах.

Примером такой диагностики служит постоянное фиксирование и регулирование температуры выпускных газов судового ДВС, путем изменения процентного соотношения подачи топлива по цилиндрам. Поскольку, значение последних является существенным фактором во время оценивания характеристик работы и общего состояния составляющих узлов судового ДВС.

В данной статье диагностируются постоянно изменяющиеся параметры, из-за изменения внешних условий работы механизма. Однако, учесть все такие переменные, пока что, не является возможным из-за большой сложности вычислений и моделирования.

К проблемным задачам диагностики так же отнесем влияние шумов измерения, которые влияют на вид указанных характеристик.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На сегодняшний день теротехнология не имеет большого распространения в судоходстве, однако, примеры ее удачного применения существуют. Так авторами в источнике [1] рассмотрено применение данной технологии для металлургического оборудования, с целью, повышения эксплуатационной надежности, обеспечивающей стабильную работу оборудования и остальные показатели эффективности (расход энергоресурсов, качество выпускаемой продукции и др.).

При проведении анализа технической литературы и публикаций на тему влияния критериев достоверности контроля при проектировании систем автоматизации и мониторинга, авторами был проанализирован подход к проектированию предложенный инженерами немецкого концерна «KONGSBERG». Которые, внедрив нечеткую алгоритмизацию мониторинга судового электрооборудования, достигли повышения качества оценки достоверности контролируемых параметров [2].

**Цель статьи.** Целью статьи является аналитическое и практическое исследование влияния достоверности допусков первого и второго уровня, во время контроля значений параметров работы ДВС, на работу системы мониторинга и управления двигателя.

При этом ДВС рассматривается как сложный объект, состоящий из 6 отдельных подобъектов, каждый из которых может быть представлен управляемым устройством по параметрам подачи топлива, количества и состава выпускных газов.

**Результаты исследования.** Как первый этап решения указанной проблемы, на примере кривых изменения значений температуры выпускных газов, оценено влияние выше указанных параметров на работу системы, а так же вероятность ошибок первого и второго уровней во время контроля значения параметров работы (ДВС).

На рис.1 представлен график изменения температуры выпускных газов 2-тактного 6-цилиндрового ДВС во время изменения внешних условий эксплуатации. Отметим отрыв кривой 2 от графиков остальных цилиндров в условиях электронного мониторинга, подчеркнув при этом, что механические термометры всех цилиндров стоят на одинаковых отметках.



Рис. 1 – График кривых изменения значений температуры выпускных газов ДВС при изменении условий внешней среды

**Математическая модель рассматриваемого процесса.** Используем модель контролируемого процесса в виде:

$$X(t) = a_0 \pm a_1 t^\gamma, \quad (1)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $\gamma$  – пуассоновские независимые случайные величины с главными математическими ожиданиями и дисперсиями

$$M[a_0] = m_0; M[a_1] = m_1; M[\gamma] = \gamma_0; \quad (2)$$

$$D[a_0] = \sigma_0^2; D[a_1] = \sigma_1^2; D[\gamma] = \sigma_\gamma^2, \left[ \frac{\sigma_\gamma^2}{\sigma_1^2/m_1^2} \right] \ll 1. \quad (3)$$

Тут  $a_0$  совпадает с размерностью  $X$ , размерность  $a_1$  – это размерность скорости изменения  $X$ , величина  $\gamma$  нормализует безразмерную относительную скорость изменения  $X$ .

Вместо двух составляющих поля  $N_1(t)$  и  $N_2$  введем одну эквивалентную  $\xi(t)$ , которая здесь и в дальнейшем будет иметь значение гауссова стационарного служебного символа – гауссов белый шум.

В момент контроля  $\tau_k$  случайное значение контролируемого параметра имеет вид:

$$Y_k = x(\tau_k) + \xi(\tau_k) = a_0 \pm a_1 t^\gamma + \xi(t). \quad (4)$$

Это соотношение рассматривается как математическая модель рассматриваемого процесса при диагностике параметров.

Числовых характеристик  $Y_k$  как пуассоновской случайной величины так же две, математическое ожидание:

$$M[Y_k] = m_{yk} = m_0 \pm m_1 \tau_k^\gamma \quad (5)$$

и дисперсия:

$$D[Y_k] = \sigma_0^2 + \sigma_1^2 \tau_k^{2\gamma} + \sigma_{\xi k}^2 = \sigma_{xk}^2 + \sigma_{\xi k}^2. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) вытекает, что математические ожидания  $X_k$  и  $Y_k$  идентичны:

$$M[Y(\tau_k)] = M[x(\tau_k)] = m_{yk} = m_{xk}, \quad (7)$$

а дисперсия  $Y_k$  – отличается от дисперсии  $X_k$  на величину  $\delta_{\xi k}^2$ . Если шум является величиной стационарной, то дисперсия не зависит от момента контроля:

$$\sigma_{\xi k}^2 = \sigma_{\xi i}^2 = \sigma_\xi^2. \quad (8)$$

Рассмотрим условия работоспособности и отказа системы контроля параметров. На рис. 2 показано влияние шумов на адекватность контроля нестабильного параметра. Кривая 2 отражает изменения  $x_j(t)$  контролируемого параметра  $X$  для конкретного  $j$ -го процесса – по сути, это  $j$ -я реализация  $X(t)$ . Отказ  $j$ -го изменения наступает в момент времени  $T_j$ , когда  $x_j(t)$  достигает границы допуска  $a = x_{kp}$ , где  $x_{kp}$  – критическое значение параметра.

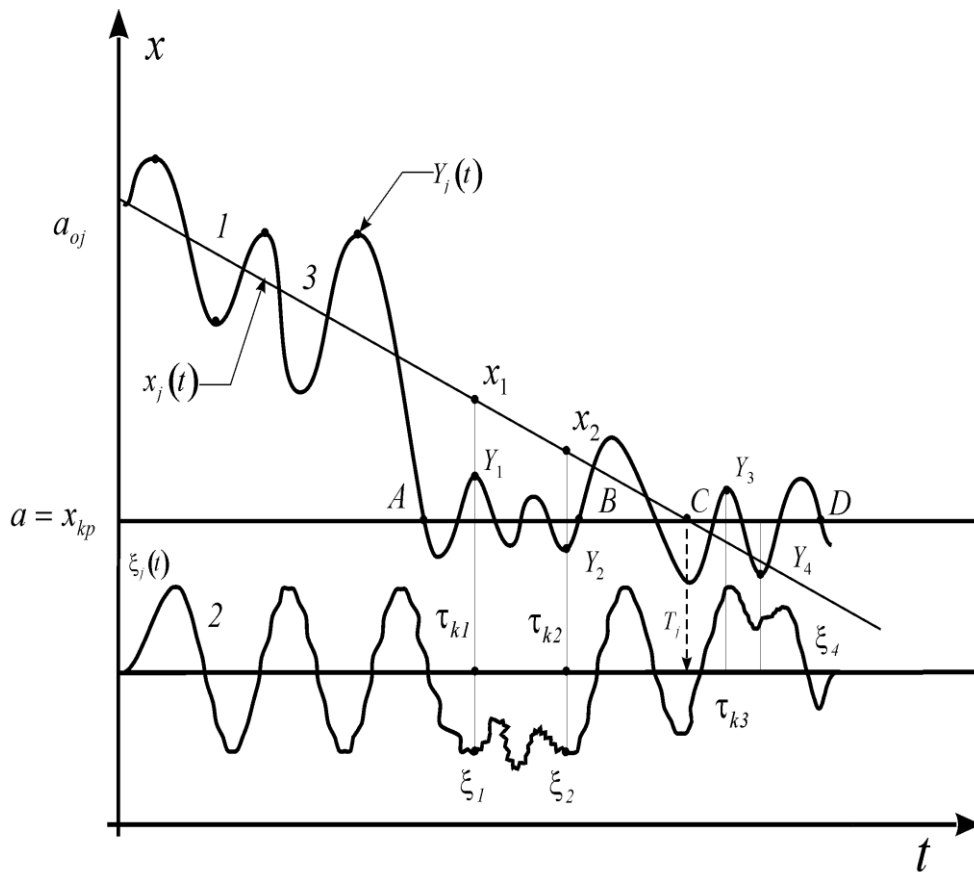


Рис. 2 – Влияние шумов на достоверность контроля нестабильного параметра  
Отсюда следует, что условие работоспособности должно иметь вид:

$$x_j(t) > x_{kp}. \tag{9}$$

При этом, условие отказа:

$$x_j(t) \leq x_{kp}, x_j(t) - x_{kp} \leq 0. \tag{10}$$

Логическое условие (10) есть фундаментально-математическим условием отказа процесса. Момент отказа процесса из условия (10) при использовании знака равенства:

$$T_j = \left( \frac{a_{0j} - x_{kp}}{a_{1j}} \right)^{1/\gamma_j}, \tag{11}$$

где поточный показатель  $j$  указывает на принадлежность к  $j$ -й реализации  $X(t)$ .

Исследуем влияние шума на достоверность контроля. На рис. 3 показана  $j$ -я реализация  $\xi_j(t)$  шума  $\xi(t)$  (кривая 2). При суммировании  $x_j(t)$  и  $\xi_j(t)$  определяется полярная регрессия  $y_j(t)$  (кривая 3), которая наблюдается в момент контроля.

Рассмотрим четыре характерных примера шумов в момент контроля  $\tau_{k1}, \tau_{k2}, \tau_{k3}, \tau_{k4}$ . В момент  $\tau_{k1}$  значение параметра  $X_1 > X_{kp}$ , значение шума  $\xi_1 < 0$ , потому что  $X_1 - \xi_1 < X_1 - X_{kp}$ , при  $Y_1 > X_{kp}$  и отметка, отсутствует из-за «малого» шума, т.е. параметр достоверен. В момент  $\tau_{k2}$  переменное значение  $X_2 > X_{kp}$ , но из-за действия шума  $Y_2 < X_{kp}$  и по разработкам контроля параметр определяется как недостоверный, то есть совершается ошибка контроля первого рода.

В момент времени  $T_j$  процесс перешел в недостоверное состояние, что следует из условия (9). Точка  $C$  характеризует пересечение  $X_j(t)$  и  $X_{kp}$ . На интервале времени  $CD$  идет контроль недостоверного верного процесса. Если он осуществляется в момент  $\tau_{k3}$ , то  $Y_3 > X_{kp}$  из-за действия шума и прослеживается ошибка второго рода. Расчеты проведены с использованием выражений (9...12).

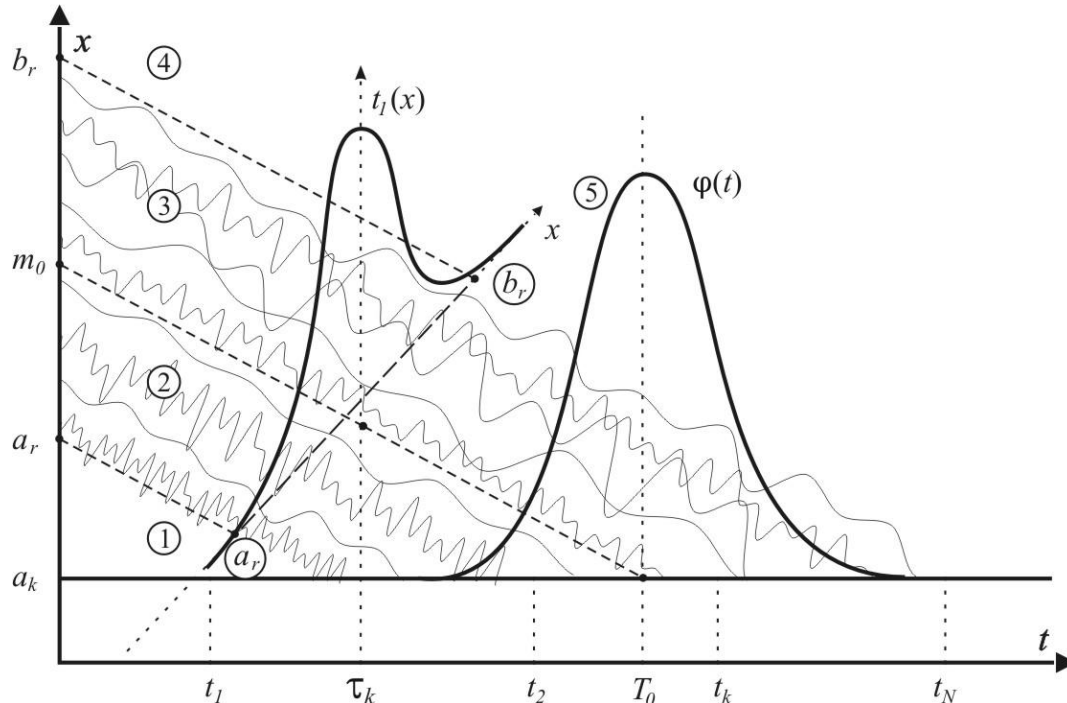


Рис. 3 – Влияние шума на контроль

**Формирование пространственных и временных характеристик контроля диагностических параметров.** На рис. 3 показана реализация  $X(t)$  при уменьшении значений контролируемого параметра, кривая имеет аналогичный вид и при увеличении значений параметра. И в том, и в другом случаях, можно рассматривать изменения, например, так:

$$Z(t) = \begin{cases} \frac{X(t) - X_{kp}}{m_0 - X_{kp}}, & m'_x(t) < 0 \\ \frac{X_{kp} - X(t)}{X_{kp} - m_0}, & m'_x(t) > 0, \quad t \in [0, T] \end{cases}, \quad (12)$$

где  $M'_x(t) = \frac{d}{dt} m_x(t)$  – производная;  $T$  – интервал наблюдения.

Параметр  $Z(t) \in [0, 1]$ , при  $X(t) = m_0$ ,  $Z(t) = 1$ , при  $X(t) = X_{kp}$ ,  $Z(t) = 0$ . Отсюда следует, что в результате нормирования  $X(t)$ , противоположные направления изменения значений параметров  $X(t)$ , сводятся к следующему: сначала параметр  $Z(t)$  принимает значение, равное единице, а потом уменьшается до нуля. Отсюда следует, что справедливо утверждение, что регрессии изменяются так, как показано на рис. 3, тем более, что в большинстве случаев, ухудшение состояния измерения ассоциируется с уменьшением значения контролируемого параметра.

Кроме того, рис. 3 показывает шумы контроля, а также поля для основных параметров расчета достоверности.

Используя проведенные расчеты, во время перенастройки системы контроля параметров судового ДВС был получен следующий результат, приведенный на рис. 4.

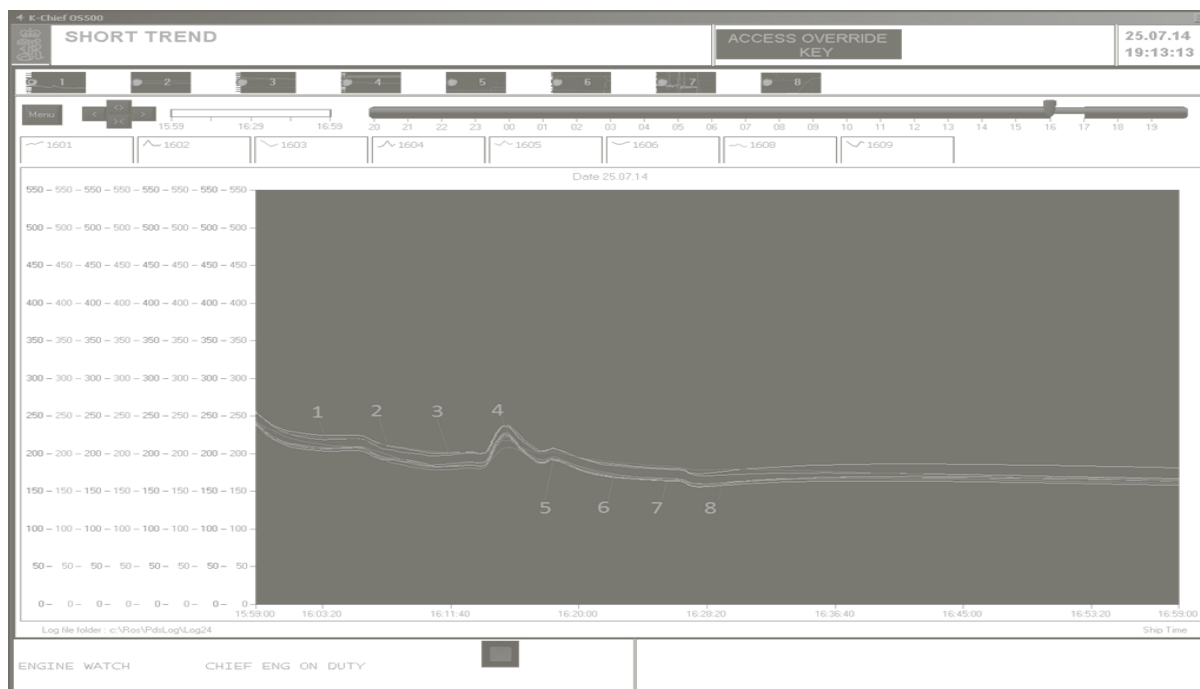


Рис.4 – График кривых изменения значений температуры выпускных газов ДВС при изменении условий внешней среды

График настроен таким образом, что: кривая 1 – температура выпускных газов цилиндра №1; кривая 2 – температура выпускных газов цилиндра №2; кривая 3 – температура выпускных газов цилиндра №3; кривая 4 – температура выпускных газов цилиндра №4; кривая 5 – температура выпускных газов цилиндра №5; кривая 6 – температура выпускных газов цилиндра №6; кривая 7 – температура выпускных газов на входе газовой турбины; кривая 8 – температура выпускных газов на выходе газовой турбины;

Следует отметить, что кривые изменения значений температуры цилиндров ДВС при изменении внешних условий эксплуатации, имеют практически идентичный переходной процесс, а так же уменьшенную разность в показаниях, по сравнению с механическими термометрами, установленными на ДВС.

Данные графиков получены экспериментальным путем с судового главного двигателя внутреннего сгорания типа WARTSILA-SULCER 6 RT-flex 50b с электронным впрыском топлива, действующего судна «m/v ER Turku» проекта WJZ24, 2009 года постройки [3].

Автоматизированная система мониторинга и контроля фирмы «KONGSBERG», позволяет механику-оператору совершить настройки метода и характера воспроизведения параметров контролируемого механизма по собственному желанию. В данном примере использована программа «Short trend», которая дает возможность в виде кривых проследить за изменением значений температуры выпускных газов ДВС.

Расчеты показывают, что шум не оказывает влияния на результаты контроля – при его малой величине, или определенном стечении обстоятельств, в другом случае влияние его существенно, что проявляется в виде появления ошибок первого и второго рода.

Показанные плоскости  $X(t)$  (1),  $\varphi(t)$  (2) и  $\xi(t)$  (3), границы полей допусков: гарантированных –  $a_1$ ,  $b_1$  и контрольных –  $a_2$ ,  $b_2$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma_x$ ,  $\sigma_\xi$  и  $\sigma_y$ , соответственно,  $X$ ,  $Y$  и  $\xi$ . Наглядно показано проявление ошибки первого рода, когда значение  $X_2$  из-за действия точки  $\xi_2$  выходит за границы интервала.

Аналогічно показано проявлення помилки другого роду, коли значення  $X_3 \notin [a_1, b_1]$  із-за дії шуму  $\xi_3$  перетворюється в  $\varphi_3 \in [a_1, b_1]$ . В той же час, якщо на протязі контролю використовувати допуски  $a_2, b_2$ , тоді і в тому, і в іншому випадку значення параметра визначаються як достовірні, оскільки  $Y_2$  і  $Y_3$  потрапляють в середину інтервалу  $[a_2, b_2]$ .

Таким чином, моделювання показує вплив критеріїв вибору гарантованого і контрольних допусків контролюваного параметра на достовірність контролю.

**Висновки.** В статті показано вплив помилки першого роду, коли значення контролюваного параметра виходить за межі інтервалу допусків параметрів роботи ДВС. Це призводить до нестабільності роботи системи контролю і моніторингу, яка в свою чергу здійснює помилкове керуюче вплив по відношенню до об'єкта регулювання – ДВС (зменшує/збільшує подачу палива в певний циліндр без потреби). Також наявність помилки другого роду, яка має місце при наявності шуму і перевищенні значенням  $X_3$  меж допусків. Це в результаті передбачає бездіяльність системи управління і моніторингу в момент потреби подати на об'єкт регулювання керуючий сигнал (зменшити/збільшити подачу палива в певний циліндр).

Таким чином, можна зробити висновок, що проявлення помилок першого і другого роду, а також шуми вимірювання, мають негативний вплив на роботу системи контролю і моніторингу, зменшують тим самим показник надійності її роботи, а також надійності роботи ДВС.

Слід зауважити, що при налаштуванні системи вимірювання (практичної реалізації вищевказаних розрахунків), в процесі експлуатації механізму, можна уникнути зниження ефективності його роботи. А також, збільшити інтервали планових технічних оглядів/ремонтів, в інтересі покращення умов експлуатації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сергиєнко Л. І. Електроенергетичні системи морських судів / Л. І. Сергиєнко, В. В. Міронов. – М. : Транспорт, 1991.
2. Надійність, ремонт і монтаж металургічних машин / В. Д. Плахтін. – М. : Металургія, 1983. – 415 с.
3. KONGSBERG K-Chief 500 Alarm and Monitoring System user & maintenance manual, SeaMate 2004 (Edition : 3.6.51.68 DB version: 6.8.4) ; Project No.: P4359701/03/04/05, 758 р.

### Ісась Є.О., Сіманенков А.Л. ОЦІНЮВАННЯ ДОСТОВІРНОСТІ КОНТРОЛЮ ДІАГНОСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ ДВЗ

*Стаття розглядає проблематику налаштування параметрів роботи системи контролю та діагностування динамічних характеристик суднового двигуна внутрішнього згорання, на прикладі двотактного шестициліндрового ДВЗ типу WARTSILA-SULCER 6 RT-flex 50b. На прикладі кривих змінень значень температури випускних газів суднового ДВЗ під час змінень умов зовнішнього середовища, показано вплив значень гарантованого та контрольних допусків на прийняття системою моніторингу рішення, щодо регулюючого впливу на об'єкт керування (ДВЗ). Аналітичним методом показаний вплив помилок першого та другого рівнів на роботу автоматичної системи стеження та управління під час змінень умов зовнішнього середовища. Авторами доведена важливість прорахунку та дослідження впливів заданих допусків, а також шумів вимірювання під час моделювання та вибору критеріїв оцінювання роботи системи вимірювання та контролю параметрів роботи суднових ДВЗ.*

**Ключові слова:** система контролю та діагностики суднового ДВЗ, гарантований допуск, контрольний допуск, помилка вимірювання.

**Isaev J.A., Simanenkov A.L. RELIABILITY ESTIMATION FOR CONTROL OF THE SHIPS ICE DIAGNOSTICS CHARACTERISTICS**

*This article deals with the control and diagnostic system parameters of the ship internal combustion engine dynamic characteristics, evidence from two – stroke 6 – cylinders ICE type WARTSILA-SULCER 6 RT-flex 50b. The influence of the guaranteed and pilot limits value on the monitoring system decision acceptance about the control action given to the plant lag (ICE) is exemplified by measuring curves changing of ICE exhaust gas temperature in accordance with external environment conditions changes. The analytical method was used to illustrate the impact of the first and second stage errors on the automatic monitoring and regulating system, in accordance with changes of external environmental conditions. The authors have proved the importance of calculation and researches of the suppositions mentioned above, as well as measurement patterns value during modeling and choosing criteria for ships ICE working parameters control and monitoring system working estimation.*

**Keywords:** ships ICE parameters control and monitoring system, guaranteed limit, pilot limit, measurement error.

© Ісаєв Є.О., Сіманенков А.Л.

Статтю прийнято  
до редакції 15.09.14

УДК 656.012.224

## ДО ПИТАННЯ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗПОДІЛУ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ МІЖ СУДНАМИ, ОБСЛУГОВУЮЧИМИ МАГІСТРАЛЬНО-ФІДЕРНІ ЛІНІЇ

*Кириллова О.В.*

*Одеський національний морський університет*

*Стаття присвячена вдосконаленню методичного забезпечення лінійних судноплавних компаній у частині прийняття рішень щодо розподілу контейнеропотоків, які йдуть в режимі траншшипменту у магістрально-фідерному сполученні. На основі методичного і математичного апаратів лінійного програмування в роботі сформулювалась змістовна постановка задачі і розроблена її економіко-математична модель. В моделі, на відміну від існуючої, в якості критерію оптимальності виступають витрати Судновласника; наведені обмеження, які враховують те, що не всі партії контейнерів призначаються для вивантаження у фідерних портах; введені умови балансу. Запропонована економіко-математична модель має прикладне значення для судноплавних компаній, експедиторів, лінійних агентів, логістів та мультимодальних операторів.*

**Ключові слова:** контейнер, судно, лінія, магістрально-фідерна лінія.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Сьогодні у міжнародному морському суднопластві широко розповсюджена практика магістрально-фідерного обслуговування контейнеропотоків. Реалізація цієї транспортної послуги практично неможлива без застосування у портах перевалювання режиму траншшипменту. У сучасній транспортній періодиці все частіше з'являються публікації про впровадження та правове регулювання цієї сучасної системи проходження транзитних контейнерів через морські торговельні порти України [1–9]. У зв'язку з цим не викликає сумніву актуальність і своєчасність постановки та розгляду проблеми щодо розробки науково-теоретичного і методичного забезпечення процесів прийняття рішень, пов'язаних з реалізацією окремих задач магістрально-фідерного обслуговування контейнеропотоків, що йдуть в режимі траншшипменту через українські порти.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких розпочато розв'язання даної проблеми, і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Магістрально-фідерне обслуговування контейнеропотоків – сучасна практика надання транспортних послуг клієнтам судноплавних компаній. Незважаючи на це, до недавнього часу в роботах вітчизняних авторів зустрічалося тільки відокремлення цього виду лінійних сервісів без наведення їх класифікаційних ознак, наприклад:

- в роботах [10–15] на рівні загального опису перелічені магістральні, фідерні та магістрально-фідерні лінії;
- в монографії [16] варіант магістрально-фідерного обслуговування регулярних вантажопотоків наводиться лише як приклад складової лінії.

На ряду з цим в публікації [17] сформована концептуальна основа сучасної класифікації судноплавних ліній і систематизовані їх види з докладним наведенням їх групових та індивідуальних ознак.

В роботах [18, 19] обґрунтований взаємозв'язок між магістрально-фідерним обслуговуванням контейнеропотоків і траншшипментом – спрощеною формою митного оформлення контейнерів під час перевантаження їх з одного судна на інше. У [18, 19] наводяться існуючі варіанти змісту поняття «траншшипмент», докладно описується ретроспектива появи і становлення однойменного режиму обслуговування контейнеропотоків в Україні. Автори статті [18] зазначають, що «... недавно поняття «траншшипмент» в українському законодавстві не використовувалося, а застосування відповідного режиму перевалки контейнерів через українські порти було неможливим, через відсутність відповідного правового поля, що регулює і регламентує подібні операції. Замість траншшипменту в портах України застосовувався режим звичайного транзиту [20, 21]. У зв'язку з цим, фідерне обслуговування вантажопотоків в українських

портах було утруднено. Однак у 2010 р. ситуація змінилася. Законом України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо спрощення митного оформлення транзитних вантажів» [22] був законодавчо закріплений спрощений порядок проходження транзитних контейнерів у режимі трансшипменту через морські торговельні порти України [7]. З'явилося поняття транзиту «море–море», котрий був звільнений від необхідності оформлення митної декларації [7]. І у вересні 2010 р. вперше в Україні режим трансшипменту був застосований в Одеському морському торговому порту [6]». Це обумовило важливість розгляду питань, пов'язаних із сформульованою вище проблемою, розв'язання якої було досить вдало розпочато в роботах [18]. У ній розроблені теоретичні та методичні положення, які дозволяють оптимізувати розподіл контейнеропотоків між суднами, що працюють у магістрально-фідерному сполученні. Але наведена в [18, 19] економіко-математична модель, нажаль, не бере до уваги деякі особливості організації лінійних перевезень контейнерів у магістрально-фідерному сполученні. Наприклад в економіко-математичній моделі, наведеній у [18, 19]:

- в якості критерію оптимальності виступає прибуток Судновласника, який необхідно максимізувати. Але це може привести до такого розподілу контейнеропотоків, при якому підвищуються втрати Вантажовласників, які, за будь-яких умов, прагнуть здійснити перевезення з мінімальними для них витратами;

- не враховується той факт, що прибуток Судновласника може буди збільшений не за рахунок підвищення його доходів, а, в першу чергу, особливо в умовах кризи, за рахунок мінімізації його експлуатаційних витрат;

- відсутні обмеження, які дозволяють врахувати те, що не всі партії контейнерів, згідно з умовами торгових контрактів, а також заявкам Вантажовласників, призначаються для вивантаження у фідерних портах. Портами призначення деяких контейнерів можуть бути магістральні порти перевалювання, в яких вони або передаються Вантажовласникам, або перевалюються на суміжні виду транспорту;

- відсутня в явному вигляді умова балансу.

У зв'язку з цим, однією з важливих виробничих задач, вирішенню якої присвячене це дослідження, і яка, безумовно, є частиною сформульованої вище проблеми, є вдосконалення теоретичних і методичних положень щодо обґрунтування оптимального варіанту розподілу контейнеропотоків, що йдуть в режимі трансшипменту, між магістральними та фідерними лініями.

**Формулювання мети статті.** Мета дослідження – підвищення ефективності функціонування лінійних судноплавних компаній шляхом вдосконалення їх методичного забезпечення у частині прийняття рішень щодо обґрунтування оптимального розподілу контейнеропотоків, які йдуть в режимі трансшипменту між магістральними та фідерними лініями.

**Виклад матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.** Враховуючи особливості експлуатації лінійного тоннажу на магістрально-фідерних лініях, а також конструктивні і техніко-експлуатаційні характеристики суден-контейнеровозів, змістовна постановка задачі оптимального розподілу контейнеропотоків між суднами, обслуговуваними магістрально-фідерні сполучення, в загальному вигляді формулюється наступним чином.

Судноплавна компанія (СК) пропонує Вантажовласникам ряд лінійних сервісів  $L_i^{CK} = \{1, 2, \dots, L, \dots, L^{CK}\}$ .

Судноплавна лінія  $L \in L_i^{CK}$  є магістрально-фідерною.

Магістральна частина лінії  $L \in L_i^{CK}$  пов'язує порти – хаби відправлення  $i = \overline{1; I}$  і призначення  $g = \overline{1; G}$ . При цьому, магістральний напрямок лінії  $L \in L_i^{CK}$  обслуговується великотоннажними контейнеровозами  $b = \overline{1; B}$ , які мають наступні характеристики:

а) розрахункову величину вантажопідйомності, яка відповідає умовам експлуатації судна на даному напрямку –  $Dc_L^b (L \in L_i^{CK}, b = \overline{1;B})$ , т;

б) контейнеромісткість, включаючи:

– загальну кількість контейнерів, яку судно може прийняти на борт і яка виражається в 20-футовому еквіваленті –  $TEU_L^b (L = \overline{1;L^{CK}}, b = \overline{1;B})$ ;

– кількість 20-футових контейнерів –  $N_L^{b^{20'}} (L = \overline{1;L^{CK}}, b = \overline{1;B})$ ;

– кількість 40-футових контейнерів –  $N_L^{b^{40'}} (L = \overline{1;L^{CK}}, b = \overline{1;B})$ .

У свою чергу, фідерна частина лінії  $L \in L_i^{CK}$  пов'язує магістральні порти призначення  $g = \overline{I;G}$  океанських вантажопотоків із фідерними портами  $j = \overline{I;J}$ , тобто магістральні порти призначення  $g = \overline{I;G}$  одночасно є портами відправлення контейнеропотоків на фідерні порти  $j = \overline{I;J}$ . При цьому, перевезення вантажів на фідерних напрямках складеної лінії  $L \in L_i^{CK}$  між портами відправлення  $g = \overline{I;G}$  і призначення  $j = \overline{I;J}$  відбуваються мало- та середньотоннажними суднами  $b' = \overline{1;B'}$ , які мають наступні характеристики:

а) розрахункову величину вантажопідйомності –  $Dc_L^{b'} (L \in L_i^{CK}, b' = \overline{1;B'})$ , т;

б) контейнеромісткість, включаючи:

– загальну кількість  $TEU$ , яку фідерне судно може прийняти на борт –  $TEU_L^{b'} (L = \overline{1;L^{CK}}, b' = \overline{1;B'})$ ;

– кількість 20-футових контейнерів –  $N_L^{b'^{20'}} (L = \overline{1;L^{CK}}, b' = \overline{1;B'})$ ;

– кількість 40-футових контейнерів –  $N_L^{b'^{40'}} (L = \overline{1;L^{CK}}, b' = \overline{1;B'})$ .

Відповідно до заявок Вантажовласників:

– із магістрального порту  $i = \overline{I;I}$  повинні бути відправлені контейнери типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{1;R}$  в кількості  $N_i^{r'n}$  (величина пропозиції). Наприклад, кількість 20-футових контейнерів складає  $N_i^{r'20'}$ ; 40-футових –  $N_i^{r'40'}$ ;

– далі портом призначення контейнерів типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{1;R}$ , які відправляються з магістрального порту  $i = \overline{I;I}$ , може бути (згідно коносаменту) магістральний порт  $g = \overline{I;G}$  або фідерний порт  $j = \overline{1;J}$  лінії  $L \in L_i^{CK}$ .

При цьому:

– якщо портом призначення контейнерів є магістральний порт  $g = \overline{I;G}$ , то величина попиту у відповідному магістральному порту позначається так  $N_g^{r'n}$ . Наприклад, кількість 20-футових контейнерів складає  $N_g^{r'20'}$ ; 40-футових –  $N_g^{r'40'}$ ;

– якщо портом призначення контейнерів є фідерний порт  $j = \overline{1;J}$ , то величина попиту у відповідному фідерному порту позначається так  $N_j^{r'n}$ . Наприклад, кількість 20-футових –  $N_j^{r'20'}$ ; 40-футових –  $N_j^{r'40'}$ .

У кожному порту відправлення ( $i = \overline{1;I}$ ,  $g = \overline{1;G}$ ) магістрально-фідерної лінії агенту виділяється певний еллотмент (allotment) або квота контейнеромісткості магістрального ( $b = \overline{1;B}$ ) і, відповідно, фідерного ( $b' = \overline{1;B'}$ ) судна в  $TEU$  з розбивкою по експорту ( $TEU_i^{\mathcal{E}*b}$ ,  $TEU_g^{\mathcal{E}*b}$ ), імпорту ( $TEU_i^{I* b}$ ,  $TEU_g^{I* b}$ ) і транзиту ( $TEU_i^{T* b}$ ,  $TEU_g^{T* b}$ ).

Необхідно розподілити задану кількість контейнерів типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  між суднами, які обслуговують магістрально-фідерні лінії компанії таким чином, щоб мінімізувати витрати Судновласника.

Для визначення критерію оптимальності вище сформульованої задачі та встановлення параметрів управління необхідно врахувати те, що власна система магістрально-фідерного обслуговування лінії  $L \in L_l^{CK}$  передбачає:

- перевезення контейнерів клієнтів даної лінії від магістрального порту відправлення  $i = \overline{1; I}$  до фідерного порту  $j = \overline{1; J}$  через магістральний порт перевалювання  $g = \overline{1; G}$  за відповідними заздалегідь встановленими тарифними ставками;

- надання послуг за комерційним фідером (*кф*), тобто освоєння епізодичних контейнеропотоків тільки на фідерні порти за тарифною ставкою, розрахованою агентом на основі Rate Guideline (RGL);

- надання послуг за магістральним і/або фідерним обслуговуванням контейнеропотоків компаній-партнерів по лінійному бізнесу на основі слот-чартерних (*с-ч*) угод за відповідними, заздалегідь встановленими і узгодженими з учасниками договору тарифними ставками.

Враховуючи змістовну постановку задачі, її економіко-математична модель, представляється у наступному вигляді:

Цільова функція в загальному вигляді являє собою лінійну функцію, яка мінімізує витрати Судновласника:

$$Z = \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B R_{igL}^b + \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{b'=1}^{B'} R_{gjL}^{b'} \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $R_{igL}^b; R_{gjL}^{b'}$  – витрати судноплавної лінії  $L \in L_l^{CK}$  під час обслуговування, відповідно, магістральних і фідерних напрямків. Статті витрат, що входять до структури даних показників, встановлює особа, що приймає рішення.

Цільову функцію (1) також слід представити у вигляді функції декількох змінних, значення яких підлягають пошуку в процесі мінімізації заданого критерію оптимальності, з метою рішення сформульованої задачі:

$$Z = \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} r_{igL}^{TEU} \cdot k_n^{TEU} \cdot (x_{igL}^{bm} \cdot Y_i^m + x_{igL(c-ч)}^{bm} \cdot Y_i^m) + \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{b'=1}^{B'} \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} r_{gjL}^{TEU} \cdot k_n^{TEU} \cdot (x_{gjL}^{b'm} \cdot Y_j^m + x_{gjL(кф)}^{b'm} \cdot Y_j^m + x_{gjL(c-ч)}^{b'm} \cdot Y_j^m) \right] \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $r_{igL}^{TEU}, r_{gjL}^{TEU}$  – питомі витрати, що припадають на один *TEU* магістрального і, відповідно, фідерного напрямків;  $k_n^{TEU}$  – коефіцієнт переведення фактичної кількості контейнерів типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  в 20-футовий еквівалент (*TEU*). Наприклад: для 10-футових контейнерів  $k_{10'}^{TEU} = 0,5$ ; для 20-футових:  $k_{20'}^{TEU} = 1$ ; для 40-футових:  $k_{40'}^{TEU} = 2$ ; для 45-футових:  $k_{45}^{TEU} = 2,25$ ;  $x_{igL}^{brn}, x_{igL(c-ч)}^{brn}, x_{gjL}^{b'rn}, x_{gjL(кф)}^{b'rn}, x_{gjL(c-ч)}^{b'rn}$  – параметри управління, значення яких встановлюється в процесі рішення задачі розподілу, і котрі позначають наступне:  $x_{igL}^{brn}$  – кількість контейнерів типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{1; R}$ , які перевозяться судном  $b = \overline{1; B}$  між магістральними портами  $i = \overline{1; I}$  і  $g = \overline{1; G}$  судноплавної лінії  $L \in L_l^{CK}$ ;  $x_{igL(c-ч)}^{brn}; x_{gjL(c-ч)}^{b'rn}$  – кількість контейнерів типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{1; R}$ , які перевозяться на магістральному і, відповідно, фідерному напрямках в рамках слот-чартерних угод;  $x_{gjL}^{b'rn}$  – кількість

контейнерів типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{I; R}$ , які перевозяться фідерним судном  $b' = \overline{I; B'}$  між магістральним  $g = \overline{I; G}$  і фідерним  $j = \overline{I; J}$  портами складеної лінії  $L \in L_i^{CK}$ ;  $x_{gjl(\kappa\phi)}^{brm}$  – кількість контейнерів типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{I; R}$ , які перевозяться судном  $b' = \overline{I; B'}$  під час надання лінії  $L \in L_i^{CK}$  послуг комерційного фідеру;  $Y_i^m$  – екзогенний параметр, який приймає наступні значення: 1, якщо контейнер типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{I; R}$  заявлений до перевезення в магістральному порту  $i = \overline{I; I}$ ; 0 – у протилежному випадку;  $Y_j^m$  – екзогенний параметр, який приймає наступні значення: 1, якщо портом призначення контейнера типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{I; R}$ , згідно з умовами торгового контракту і заявкам Вантажовласника, є фідерний порт  $j = \overline{I; J}$ ; 0 – у протилежному випадку.

Цільова функція (2) також може бути записана у наступній інтерпретації (3), з урахуванням найбільш типових засобів укрупнення вантажів, що застосовуються в практиці сучасних лінійних перевезень, і складаються переважно з 20- і 40-футових контейнерів:

$$\begin{aligned}
 Z = & \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R r_{igL}^{TEU} \cdot (x_{igL}^{br20'} \cdot Y_i^{r20'} + x_{igL(c-u)}^{br20'} \cdot Y_i^{r20'}) + \right. \\
 & + \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{b'=1}^{B'} \sum_{r=1}^R r_{gjl}^{TEU} \cdot (x_{gjl}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'} + x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'} + x_{gjl(c-u)}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'}) + \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R 2 \cdot r_{igL}^{TEU} \cdot (x_{igL}^{br40'} \cdot Y_i^{r40'} + x_{igL(c-u)}^{br40'} \cdot Y_i^{r40'}) + \\
 & \left. + \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{b'=1}^{B'} \sum_{r=1}^R 2 \cdot r_{gjl}^{TEU} \cdot (x_{gjl}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'} + x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'} + x_{gjl(c-u)}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'}) \right],
 \end{aligned} \tag{3}$$

де  $x_{igL}^{br20'}$ ;  $x_{igL}^{br40'}$  – кількість 20- і 40-футових контейнерів партії  $r = \overline{I; R}$ , які перевозяться судном  $b = \overline{I; B}$  між  $i$ -им і  $g$ -им магістральними портами судноплавної лінії  $L \in L_i^{CK}$ ;  $x_{gjl}^{b'r20'}$ ;  $x_{gjl}^{b'r40'}$  – кількість 20- і 40-футових контейнерів партії  $r = \overline{I; R}$ , які перевозяться фідерним судном  $b' = \overline{I; B'}$  між  $g$ -им магістральним і  $j$ -им фідерним портами складеної лінії  $L \in L_i^{CK}$ ;  $x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'r20'}$ ;  $x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'r40'}$  – кількість 20- і 40-футових контейнерів партії  $r = \overline{I; R}$ , які перевозяться фідерним судном  $b' = \overline{I; B'}$  між магістральним  $g$  і фідерним  $j$  портами складеної лінії  $L \in L_i^{CK}$ , яка надає послуги з комерційного фідеру;  $x_{igL(c-u)}^{br20'}$ ;  $x_{igL(c-u)}^{br40'}$  – кількість 20- і 40-футових контейнерів партії  $r = \overline{I; R}$ , які перевозяться судном  $b = \overline{I; B}$  між магістральними портами  $i$  і  $g$  судноплавної лінії  $L \in L_i^{CK}$ , яка надає послуги з магістрального обслуговування контейнеропотоків компаній-партнерів по лінійному бізнесу на підставі слот-чартерних угод між ними;  $x_{gjl(c-u)}^{b'r20'}$ ;  $x_{gjl(c-u)}^{b'r40'}$  – кількість 20- і 40-футових контейнерів партії  $r = \overline{I; R}$ , відповідно, які перевозяться судном  $b' = \overline{I; B'}$  між магістральним портом  $g$  і аутпортом  $j$  судноплавної лінії  $L \in L_i^{CK}$ , яка надає послуги з фідерного обслуговування контейнеропотоків компаній-партнерів на підставі слот-чартерних угод між ними;  $Y_i^{r20'}$ ;  $Y_i^{r40'}$  – параметри, які приймають наступні значення: 1, якщо 20- і, відповідно, 40-футові контейнери партії  $r = \overline{I; R}$  заявлені до перевезення у

магістральному порту  $i = \overline{I}; \overline{I}$ ; 0 – у протилежному випадку;  $Y_j^{r20'}$ ;  $Y_j^{r40'}$  – параметри, які приймають наступні значення: 1, якщо портом призначення 20- і, відповідно, 40-футових контейнерів партії  $r = \overline{I}; \overline{R}$  є фідерний порт  $j = \overline{I}; \overline{J}$ ; 0 – у протилежному випадку.

Для реалізації вищесформульованої задачі необхідно послідовно формалізувати її обмежувальні умови.

Кількість контейнерів, завантажених у кожному порту лінії, не повинна перевищувати значення еллотмента (allotment), виділеного агенту в даному порту, з розбивкою по експорту, імпорту і транзиту. У зв'язку з цим в економіко-математичну модель вводяться обмеження (4-5):

для магістрального сполучення:

– з експорту:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{igL}^{brn} \cdot \mathcal{E}_i^{rn} \cdot K_i^{\mathcal{E}^*b}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot \mathcal{E}_i^{rn} \cdot K_i^{\mathcal{E}^*b}) \right] \leq TEU_i^{\mathcal{E}^*b} \quad (4)$$

$$(b = \overline{I}, \overline{B}; i = \overline{I}, \overline{I});$$

– з імпорту:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{igL}^{brn} \cdot I_i^{rn} \cdot K_i^{I^*b}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot I_i^{rn} \cdot K_i^{I^*b}) \right] \leq TEU_i^{I^*b} \quad (5)$$

$$(b = \overline{I}, \overline{B}; i = \overline{I}, \overline{I});$$

– з транзиту:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{igL}^{brn} \cdot T_i^{rn} \cdot K_i^{T^*b}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot T_i^{rn} \cdot K_i^{T^*b}) \right] \leq TEU_i^{T^*b} \quad (6)$$

$$(b = \overline{I}; \overline{B}; i = \overline{I}, \overline{I});$$

для фідерного сполучення:

– з експорту:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{gjl}^{b'rn} \cdot \mathcal{E}_g^{rn} \cdot K_g^{\mathcal{E}^*b'}) + (x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'rn} \cdot \mathcal{E}_g^{rn} \cdot K_g^{\mathcal{E}^*b'}) + (x_{gjl(c-y)}^{b'rn} \cdot \mathcal{E}_g^{rn} \cdot K_g^{\mathcal{E}^*b'}) \right] \leq TEU_g^{\mathcal{E}^*b'} \quad (7)$$

$$(b' = \overline{I}, \overline{B}'; g = \overline{I}, \overline{G});$$

– з імпорту:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{gjl}^{b'rn} \cdot I_g^{rn} \cdot K_g^{I^*b'}) + (x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'rn} \cdot I_g^{rn} \cdot K_g^{I^*b'}) + (x_{gjl(c-y)}^{b'rn} \cdot I_g^{rn} \cdot K_g^{I^*b'}) \right] \leq TEU_g^{I^*b'} \quad (8)$$

$$(b' = \overline{I}, \overline{B}'; g = \overline{I}, \overline{G});$$

– з транзиту:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{gjl}^{b'rn} \cdot T_g^{rn} \cdot K_g^{T^*b'}) + (x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'rn} \cdot T_g^{rn} \cdot K_g^{T^*b'}) + (x_{gjl(c-y)}^{b'rn} \cdot T_g^{rn} \cdot K_g^{T^*b'}) \right] \leq TEU_g^{T^*b'} \quad (9)$$

$$(b' = \overline{I; B'}, g = \overline{I; G}),$$

де  $\mathcal{E}_i^{rn}; I_i^{rn}; T_i^{rn} (\mathcal{E}_g^{rn}; I_g^{rn}; T_g^{rn})$  - параметри, які приймають такі значення: 1, якщо контейнер типорозміру  $n \in N$  партії  $r = \overline{I; R}$ , заброньований для перевезення в магістральному напрямку з порту  $i = \overline{I; I}$  (у фідерному напрямку з порту  $g = \overline{I; G}$ ), відноситься, відповідно, до експортного, імпортного чи транзитного вантажопотоку;  $K_i^{\mathcal{E}*b}; K_i^{I*b}; K_i^{T*b} (K_g^{\mathcal{E}*b}; K_g^{I*b}; K_g^{T*b})$  - параметри, які приймають такі значення: 1, якщо судно  $b = \overline{I; B}$  ( $b' = \overline{I; B'}$ ) згідно з угодою лінійного об'єднання (конференції) може освоювати, відповідно, експортний, імпортний і/або транзитний вантажопотік в магістральному (фідерному) напрямку; 0, у протилежному випадку.

Група обмежень (10-12) з вивезення всіх вантажів, забукірованих і заброньованих до завантаження на судно в магістральному порту  $i = \overline{I; I}$  складеної лінії: – у загальному вигляді:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{brn} \cdot Y_i^{rn}) + (x_{igL(c-u)}^{brn} \cdot Y_i^{rn}) \right] = N_i^{rn} \quad (10)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; i = \overline{I; I});$$

– по кількості 20-футових контейнерів:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{br20'} \cdot Y_i^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{igL(c-u)}^{br20'} \cdot Y_i^{r20'} \cdot Z^{20'}) \right] = N_i^{r20'} \quad (11)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; i = \overline{I; I});$$

– по кількості 40-футових контейнерів:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{br40'} \cdot Y_i^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{igL(c-u)}^{br40'} \cdot Y_i^{r40'} \cdot Z^{40'}) \right] = N_i^{r40'} \quad (12)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; i = \overline{I; I}).$$

Група обмежень (13) – (15) по задоволенню попиту у магістральних портах  $g = \overline{I; G}$ : – у загальному вигляді:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{brn} \cdot Y_g^{rn}) + (x_{igL(c-u)}^{brn} \cdot Y_g^{rn}) \right] = N_g^{rn} \quad (13)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; g = \overline{I; G});$$

– по кількості 20-футових контейнерів:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{br20'} \cdot Y_g^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{igL(c-u)}^{br20'} \cdot Y_g^{r20'} \cdot Z^{20'}) \right] = N_g^{r20'} \quad (14)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; g = \overline{I; G});$$

– по кількості 40-футових контейнерів:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{br40'} \cdot Y_g^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{igL(c-y)}^{br40'} \cdot Y_g^{r40'} \cdot Z^{40'}) \right] = N_g^{r40'} \quad (15)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; g = \overline{I; G}),$$

де  $Y_g^{rn}$  – екзогенний параметр, який приймає наступні значення: 1, якщо портом призначення контейнера типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{I; R}$  є магістральний порт  $g = \overline{I; G}$ ; 0 – у протилежному випадку;  $Z^{20'}, Z^{40'}$  – параметри, які приймають наступні значення: 1, якщо контейнер є 20- і, відповідно, 40-футовим; 0 – у протилежному випадку.

Група обмежень (16) – (18) по задоволенню попиту у фідерних портах  $j = \overline{I; J}$ :

– у загальному вигляді:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b'=1}^{B'} (x_{gjl}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn}) + (x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn}) + (x_{gjl(c-y)}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn}) \right] = N_j^{rn} \quad (16)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; j = \overline{I; J});$$

– по кількості 20-футових контейнерів:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b'=1}^{B'} (x_{gjl}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{gjl(c-y)}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) \right] = N_j^{r20'} \quad (17)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; j = \overline{I; J});$$

– по кількості 40-футових контейнерів:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b'=1}^{B'} (x_{gjl}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{gjl(\kappa\phi)}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{gjl(c-y)}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) \right] = N_j^{r40'} \quad (18)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{I; R}; j = \overline{I; J}).$$

Умову балансу можливо записати двома способами:

$N_i^{rn} = N_g^{rn} + N_j^{rn}$ , що позначає наступне: кількість контейнерів, що йдуть із магістрального порту  $i = \overline{I; I}$ , повинна дорівнювати сумі контейнерів, портами призначення яких є магістральний порт  $g = \overline{I; G}$  і фідерний порт  $j = \overline{I; J}$ , відповідно;  $N_i^{rn} - N_g^{rn} = N_j^{rn}$ , що позначає наступне: різниця між кількістю контейнерів що йдуть із магістрального порту  $i = \overline{I; I}$  і кількістю контейнерів, які призначені на магістральний порт  $g = \overline{I; G}$ , повинна дорівнювати кількості контейнерів, які призначені на фідерний порт  $j = \overline{I; J}$ .

Таким чином умови балансу (19) – (21) для даної задачі набувають наступного вигляду:

– у загальному вигляді:

$$\sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{brn} \cdot Y_i^{rn}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot Y_i^{rn}) \right] = \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{brn} \cdot Y_g^{rn}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot Y_g^{rn}) \right] + \quad (19)$$

$$+ \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b'=1}^{B'} (x_{gjL}^{brn} \cdot Y_j^{rn}) + (x_{gjL(\kappa\phi)}^{brn} \cdot Y_j^{rn}) + (x_{gjL(c-y)}^{brn} \cdot Y_j^{rn}) \right];$$

– по кількості 20-футових контейнерів:

$$\begin{aligned} & \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{br20'} \cdot Y_i^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{igL(c-y)}^{br20'} \cdot Y_i^{r20'} \cdot Z^{20'}) \right] = \\ & = \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{br20'} \cdot Y_g^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{igL(c-y)}^{br20'} \cdot Y_g^{r20'} \cdot Z^{20'}) \right] \right] + \end{aligned} \quad (20)$$

$$+ \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b'=1}^{B'} (x_{gjL}^{br20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{gjL(\kappa\phi)}^{br20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{gjL(c-y)}^{br20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) \right];$$

– по кількості 40-футових контейнерів:

$$\begin{aligned} & \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{br40'} \cdot Y_i^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{igL(c-y)}^{br40'} \cdot Y_i^{r40'} \cdot Z^{40'}) \right] = \\ & = \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^B (x_{igL}^{br40'} \cdot Y_g^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{igL(c-y)}^{br40'} \cdot Y_g^{r40'} \cdot Z^{40'}) \right] \right] + \end{aligned} \quad (21)$$

$$+ \sum_{L=1}^{L^{CK}} \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{b'=1}^{B'} (x_{gjL}^{br40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{gjL(\kappa\phi)}^{br40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{gjL(c-y)}^{br40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) \right] = N_j^{r40'}.$$

Група обмежень (22) – (24) по контейнеромісткості суден, обслуговуючих магістральну частину складової лінії:

– за кількістю TEU :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{igL}^{brn} \cdot Y_i^{rn} \cdot k_n^{TEU}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot Y_i^{rn} \cdot k_n^{TEU}) \leq TEU_L^b; \quad (22)$$

$$(L = \overline{1; L^{CK}}, b = \overline{1; B});$$

– по кількості 20-футових контейнерів:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G \sum_{r=1}^R (x_{igL}^{brn} \cdot Y_i^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot Y_i^{r20'} \cdot Z^{20'}) \leq N_L^{b20'} \quad (23)$$

$$(L = \overline{1; L^{CK}}, b = \overline{1; B});$$

– по кількості 40-футових контейнерів:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G \sum_{r=1}^R (x_{igL}^{brn} \cdot Y_i^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot Y_i^{r40'} \cdot Z^{40'}) \leq N_L^{b40'}; \quad (24)$$

$$(L = \overline{1; L^{CK}}, b = \overline{1; B}).$$

Група обмежень (25) – (27) по контейнеромісткості суден, обслуговуючих фідерну частину складової лінії.

– за кількістю TEU :

$$\sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{gjL}^{brn} \cdot Y_j^{rn} \cdot k_n^{TEU}) + (x_{gjL(\kappa\phi)}^{brn} \cdot Y_j^{rn} \cdot k_n^{TEU}) + (x_{gjL(c-y)}^{brn} \cdot Y_j^{rn} \cdot k_n^{TEU}) \leq TEU_L^{b'}, \quad (25)$$

$$(L = \overline{1; L^{CK}}, b' = \overline{1; B'});$$

– за кількістю 20-футових контейнерів:

$$\sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R (x_{gjL}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{gjL(\kappa\phi)}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) + (x_{gjL(c-y)}^{b'r20'} \cdot Y_j^{r20'} \cdot Z^{20'}) \leq N_L^{b'20'} \quad (26)$$

$$(L = \overline{I}; L^{CK}, b' = \overline{I}; B');$$

– за кількістю 40-футових контейнерів:

$$\sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R (x_{gjL}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{gjL(\kappa\phi)}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) + (x_{gjL(c-y)}^{b'r40'} \cdot Y_j^{r40'} \cdot Z^{40'}) \leq N_L^{b'40'} \quad (27)$$

$$(L = \overline{I}; L^{CK}, b' = \overline{I}; B').$$

Обмеження (28) по вантажопідйомності суден, які обслуговують магістральну частину складеної лінії:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{g=1}^G \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{igL}^{brn} \cdot Y_i^{rn} \cdot q_{igL}^{brn}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot Y_i^{rn} \cdot q_{igL}^{brn}) \leq D\mu_L^b \quad (28)$$

$$(L = \overline{I}; L^{CK}, b = \overline{I}; B).$$

Обмеження (29) по вантажопідйомності суден, які обслуговують фідерну частину складеної лінії  $L \in L_i^{CK}$ :

$$\sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{gjL}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn} \cdot q_{gjL}^{b'rn}) + (x_{gjL(\kappa\phi)}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn} \cdot q_{gjL}^{b'rn}) + (x_{gjL(c-y)}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn} \cdot q_{gjL}^{b'rn}) \leq D\mu_L^{b'} \quad (29)$$

$$(L = \overline{I}; L^{CK}, b' = \overline{I}; B'),$$

де  $q_{igL}^{brn}, q_{gjL}^{b'rn}$  – середньозважена маса контейнерів типорозміру  $n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}$  партії  $r = \overline{I}; R$ , які перевозяться суднами  $b = \overline{I}; B$  і  $b' = \overline{I}; B'$  на магістральному ( $i - g$ ) і, відповідно, фідерному ( $g - j$ ) напрямках судноплавної лінії  $L \in L_i^{CK}$ .

Обмеження (30) з використання площ контейнерного терміналу по прибуттю контейнерів, доставлених суднами лінії  $L = \overline{I}; L^{CK}$  в магістральний порт призначення  $g = \overline{I}; G$ :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{igL}^{brn} \cdot Y_i^{rn}) + (x_{igL(c-y)}^{brn} \cdot Y_i^{rn}) \leq d_{gL}^{TEU} \quad (30)$$

$$(L = \overline{I}; L^{CK}, g = \overline{I}; G).$$

Обмеження (31) по використанню площ контейнерного терміналу з відправлення контейнерів, що йдуть в режимі траншипменту з магістрального в фідерний порт призначення:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{b=1}^{B'} \sum_{r=1}^R \sum_{n=10'}^{N'} (x_{gjL}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn}) + (x_{gjL(\kappa\phi)}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn}) + (x_{gjL(c-y)}^{b'rn} \cdot Y_j^{rn}) \leq d_{gL}^{TEU} \quad (31)$$

$$(L = \overline{I}; L^{CK}, g = \overline{I}; G),$$

де  $d_{gL}^{TEU}$  – пропускна здатність контейнерного терміналу в магістральному порту  $g = \overline{I}; G$ , який обслуговується судноплавною лінією  $L = \overline{I}; L^{CK}, TEU$ .

Обмеження (32-38) накладаються на параметри управління економіко-математичної моделі.

Умови невід'ємності змінних (32), (33):

$$x_{igL}^{brn} \geq 0; x_{igL(c-ч)}^{brn} \geq 0 \quad (32)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{1, R}; b = \overline{1, B}; L \in L_i^{CK}; i = \overline{1, I}; g = \overline{1, G});$$

$$x_{gjl}^{b'rn} \geq 0; x_{gjl(кф)}^{b'rn} \geq 0; x_{gjl(c-ч)}^{b'rn} \geq 0 \quad (33)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{1, R}; b' = \overline{1, B'}; L \in L_i^{CK}; g = \overline{1, G}; j = \overline{1, J}).$$

Умови цілочисельності змінних (34), (35):

$$x_{igL}^{brn} = 1, 2, \dots, K; x_{igL(c-ч)}^{brn} = 1, 2, \dots, K \quad (34)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{1, R}; b = \overline{1, B}; L \in L_i^{CK}; i = \overline{1, I}; g = \overline{1, G});$$

$$x_{gjl}^{b'rn} = 1, 2, \dots, K; x_{gjl(кф)}^{b'rn} = 1, 2, \dots, K; x_{gjl(c-ч)}^{b'rn} = 1, 2, \dots, K \quad (35)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{1, R}; b' = \overline{1, B'}; L \in L_i^{CK}; g = \overline{1, G}; j = \overline{1, J}).$$

Обмеження (36) відображає зв'язок кожного терміналу з самим собою. Оскільки ці зв'язки не мають місце на практиці, їх називають фіктивними, а в результаті реалізації всієї моделі в таблиці результатів у відповідних клітинах фіктивної діагоналі розміщуються дані, які характеризують недовикористання площ контейнерних терміналів у портах перевалки:

$$x_{ggL}^{brn} \geq 0 \quad (36)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{1, R}; b = \overline{1, B}; L \in L_i^{CK}; g = \overline{1, G}; g = g).$$

Умова (37) відображає зв'язки між контейнерними терміналами портів перевалки. Ці зв'язки є безглуздими. У зв'язку з цим відповідна змінна приймає значення 0:

$$x_{ggL}^{brn} = 0 \quad (37)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{1, R}; b = \overline{1, B}; L \in L_i^{CK}; g = \overline{1, G}; g \neq g).$$

Умови (38) забороняють пряму доставку контейнерів суднами з магістрального порту відправлення у фідерний порт лінії:

$$x_{ijL}^{brn} = 0; x_{ijL(c-ч)}^{brn} = 0 \quad (38)$$

$$(n \in N = \{10', 20', \dots, n, \dots, N'\}; r = \overline{1, R}; b = \overline{1, B}; L \in L_i^{CK}; i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J}).$$

### Висновки

1. У процесі дослідження сформульована змістовна постановка задачі обґрунтування оптимального розподілу контейнеропотоків між суднами, які залучені до магістрально-фідерного обслуговування контейнерних вантажопотоків. Крім того, розроблена економіко-математична модель (1) – (38), в якій, на відміну від існуючої [18, 19]:

– у якості критерію оптимальності виступають витрати Судновласника, які необхідно мінімізувати;

– формалізовані обмеження, які дозволяють врахувати те, що не всі партії контейнерів, згідно з умовами торгових контрактів, а також заявкам Вантажовласників, призначаються для вивантаження у фідерних портах. Портами призначення деяких коносаментних партій контейнерів можуть бути магістральні порти перевалювання, в яких вони або передаються Вантажовласникам, або перевалюються на суміжні виду транспорту;

– введені умови балансу.

2. Розроблена і представлена вище економіко-математична модель (1-38), відноситься до класу розподільних задач лінійного програмування зі змішаними умовами.

3. Економіко-математичну модель (1-38) слід реалізовувати окремо для прямого і зворотного напрямків роботи лінійних суден. При цьому слід враховувати, що під час вирішення задачі для зворотного напрямку пунктами відправлення стають фідерні порти, а кінцевими пунктами призначення – магістральні порти.

4. Економіко-математична модель (1-38) застосовується:

– для всіх варіантів маятникових маршрутів руху магістральних і фідерних суден;

– для кругового розвізного, збірного і деяких варіантів збірно-розвізних маршрутів;

– для розподілу вантажопотоків між суднами однієї судноплавної компанії;

– для розподілу вантажопотоків між суднами компаній, що входять до складу об'єднання (конференції, альянсу). При цьому введення в економіко-математичну модель індексу, що відображає компанію, яка входить до складу об'єднання, не є обов'язковим. Необхідною і достатньою умовою при вирішенні такої задачі є наявність індексу, що позначає конкретне судно-контейнеровоз, юридична приналежність якого відома відповідним особам і не вимагає їх уточнення, забезпечуючи строгу конфіденційність інформації. Крім того, необхідна умови, що відображає частку участі судна кожної компанії в загальному обсязі перевезень відповідно до угоди, укладеної з об'єднанням [18, 19]. Дотримання даної умови забезпечується за рахунок введення до обмежень (4-9) екзогенних параметрів  $K_i^{Э*b}$ ;  $K_i^{II*b}$ ;  $K_i^{T*b}$  ( $K_g^{Э*b'}$ ;  $K_g^{II*b'}$ ;  $K_g^{T*b'}$ ).

5. Запропонована економіко-математична модель (1-38) має прикладне значення для відповідних відділів (служб) експлуатації СК, експедиторів, лінійних агентів, логістів та мультимодальних транспортних операторів в частині прийняття управлінських рішень на етапах планування та оперативного регулювання трансокеанських і фідерних перевезень контейнерів.

Проведене дослідження не вичерпує всієї глибини розглянутої тематики. У зв'язку з цим перспективи подальшого дослідження у заданому напрямку полягають у розробці та обґрунтуванні теоретичних і методичних положень щодо розподілу контейнеропотоків між суднами, обслуговуючими магістрально-фідерні лінії, які характеризуються різними варіантами збірно-розвізних маршрутів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кравченко О. А. Вибір пріоритетних напрямків організаційного розвитку морських торговельних портів України в умовах глобалізації світової економіки / О. А. Кравченко, Ю. А. Стребко // Праці Одеського політехнічного університету : зб. наук. праць. – Одеса : ОПУ, 2011. – Вип. 2 (36). – С. 284-289.

2. Альошинський Є. С. Оптимізація процесу виконання митних операцій на припортових пунктах переробки міжнародних контейнерних вантажів / Є. С. Альошинський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті : науково-технічний журнал. – Харків : Українська державна академія залізничного транспорту, 2008. – Вип. 3. – С. 3-7.

3. Додін Є. В. Митне регулювання траншшипменту / Є. В. Додін // Митна справа : науково-аналітичний журнал. – Львів, 2010. – Вип. 6 (72) – С. 26-31.
4. Мачкур Н. Формування системи траншшипменту і перспективи його розвитку / Н. Мачкур // Митна справа : науково-аналітичний журнал. – Львів, 2012. – Вип. 1 (79) – С. 105-111.
5. Вороной В. И. Перспективы оптимизации таможенного регулирования траншшипмента в портах Украины / В. И. Вороной // Митна справа : науково-аналітичний журнал. – Львів. – 2009. – № 6 (66). – С. 48-51.
6. Васьков Ю. Траншшипмент играет важную роль в борьбе за транзит [Электронный ресурс] / Ю. Васьков // Центр транспортных стратегий. – Режим доступа : <http://cfts.org.ua/opinions/40833/>.
7. Венгрук Анатолий. Траншшипмент ускоряет перевозки товаров [Электронный ресурс] : обзор результатов пятого международного «Черноморского контейнерного саммита 2011» / Анатолий Венгрук // Митна справа, 2011. – № 5 (77). – С. 56-61. – Режим доступа : [http://www.nbu.gov.ua/portal/soc\\_gum/ms/2011\\_5/56.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/soc_gum/ms/2011_5/56.pdf).
8. Наконец-то, траншшипмент [Электронный ресурс] : анонс события // BlackSeaLines. – 2010. – № 8. – Режим доступа : <http://portsukraine.com/node/1563>.
9. Скворцов Г. Ильичевск – порт траншшипмента / Г. Скворцов // Порты Украины : журнал. – Одесса : Порты Украины, 2008. – № 3 (75). – С. 12.
10. Зотов Д. К. Морское линейное судоходства / Д. К. Зотов, А. В. Блинов. – М. : Транспорт, 1970. – 136 с.
11. Блинов А. В. Экономика линейного судоходства / А. В. Блинов. – М. : ЦРИА «Морфлот», 1972. – 52 с.
12. Организация и планирование работы морского флота / А. А. Союзов, П. Р. Дубинский, О. Т. Кондрашихин, В. С. Петухов; под. ред. А. А. Союзова – М. : Транспорт, 1979. – 416 с.
13. Панарин П. Я. Развитие международного линейного судоходства / П. Я. Панарин. – Одесса : Одесский институт инженеров морского флота, 1975. – 50 с.
14. Гуревич Г.Е. Коммерческая эксплуатация морского судна / Г. Е. Гуревич, Э. Л. Лимонов. – М. : Транспорт, 1983. – 264 с.
15. Белозеров Г. И. Экономика, организация и планирование работы морского транспорта / Г. И. Белозеров, Л. М. Гаськов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1984. – 333 с.
16. Панарин П. Я. Организация работы линейного флота : монография / П.Я. Панарин. – М. : Транспорт, 1980. – 192 с.
17. Кириллов Ю. И. Обоснование классификационной принадлежности морских грузовых линий / Ю. И. Кириллов // Проблемы техники : науково-виробничий журнал. – Одеса : ОНМУ, 2010. – Вип. 1. – С. 69-77.
18. Кириллова Е. В. Магистрально-фидерное обслуживание контейнеропотоков и обоснование решений по их распределению / Е. В. Кириллова, Ю. И. Кириллов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012 : сб. научн. трудов SWorld по материалам междуна. научно-практ. конф., 18–27 декабря 2012 г., Одесса. Т. 1, вып. 4. – Одесса : Куприенко, 2012. – ЦИТ : 412-0324. – С. 10-20.
19. Кириллов Юрий Иванович. Организация и управление работой судов в контейнерной транспортно-технологической системе : дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Кириллов Юрий Иванович. – Одесса, 2013. – 312 с.
20. Про транзит вантажів : Закон України від 20.10.1999 р. // Офіційний вісник України : інформаційний бюлетень. – Київ, 1999 р. (26.11.1999). – № 45. – С. 4.
21. 870 Про затвердження Порядку переміщення товарів у пунктах пропуску через державний кордон, що розташовані на території морських портів України, під час контейнерних перевезень у прямому змішаному сполученні : постанова Кабінету

Міністрів України від 02.04.2009 р. № 320 // Офіційний вісник України : інформаційний бюлетень. – Київ, 2009 р. (17.04.2009). – № 26. – С. 50.

22. 1522 Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо спрощення митного оформлення транзитних вантажів : Закон України від 01.06.2010 р. // Офіційний вісник України : інформаційний бюлетень. – Київ, 2010 р. (02.07.2010). – № 47. – С. 14.

**Кириллова О.В.** К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОПОТОКОВ МЕЖДУ СУДАМИ, ОБСЛУЖИВАЮЩИМИ МАГИСТРАЛЬНО-ФИДЕРНЫЕ ЛИНИИ

*Статья посвящена совершенствованию методического обеспечения линейных судоходных компаний в части принятия решений по распределению контейнеропотоков, которые идут в режиме транзитного сообщения в магистрально-фидерном сообщении. На основе методического и математического аппарата линейного программирования в работе сформулирована содержательная постановка задачи и разработана ее экономико-математическая модель. В модели, в отличие от существующей: в качестве критерия оптимальности выступают расходы Судовладельца; представлены ограничения, учитывающие то, что не все партии контейнеров предназначены для выгрузки в фидерных портах; введены условия баланса. Предложенная экономико-математическая модель имеет прикладное значение для судоходных компаний, экспедиторов, линейных агентов, логистов и мультимодальных операторов.*

**Ключевые слова:** контейнер, судно, линия, магистрально-фидерная линия.

**Kirillova O.V.** QUESTION FOR OPTIMAL DISTRIBUTION OF CONTAINER TRAFFIC BETWEEN VESSELS SERVING TRANSOCEAN-FEEDER LINES

*The article is devoted to the improvement of methodical maintenance of the liner shipping companies as for making decision on the container traffic distribution, which are in the mode of transshipment in feed lines connection. The meaningful statement of the problem was formulated in this work and its economic-mathematical model was developed on the basis of the methodological and mathematical apparatus of the linear programming. Within this model, unlike the existing one, the ship-owner's expenses act as an optimality criterion. The model uncovers limitations to consider that not all the batches of containers are designed for unloading in the feeder ports. The balance conditions are introduced. Therefore, the proposed economic-mathematical model has a practical significance for shipping companies, freight forwarders, line agents, logistics and multimodal operators.*

**Keywords:** container, ship, line, feed lines.

© Кириллова О.В.

Статтю прийнято  
до редакції 13.11.14

## МОЖЛИВІ ШЛЯХИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕПЛОВИХ МАШИН В СИСТЕМАХ СЕУ

**Коробко В.В.**

*Національний університет кораблебудування ім. адмірала С.О. Макарова, м. Миколаїв*

*У статті розглянуті зміни в структурі скидних енергетичних потоків сучасних СЕУ, які пов'язані з використанням сучасних високоефективних двигунів та LNG палив. Показано, що зменшення температурних рівнів наявних скидних теплових ресурсів та поява криогенних робочих середовищ потребує впровадження нових технічних рішень. Термоакустичні технології можуть бути використані в СЕУ для утилізації таких скидних ресурсів. Базова теоретична модель свідчить, що існує принципова можливість роботи термоакустичних машин з використанням низько-температурних джерел скидної енергії. Запропоновано універсальну теплову схему утилізації вторинних енергоресурсів СЕУ з проміжним високотемпературним теплоносієм. Для СЕУ з LNG паливами розроблена принципова схема енергогенеруючої системи регазифікації криогенного палива з використанням термоакустичних технологій. Технічні рішення запропоновані в роботі можуть бути використані в сучасних СЕУ для підвищення їх загальної ефективності. Термоакустичні технології потенційно здатні забезпечити можливості для вдосконалення СЕУ, розробки принципово нових систем.*

**Ключові слова:** СЕУ, скидні енергетичні ресурси, термоакустика, LNG палива, регазифікація, теплові машини.

**Вступ.** Останнім часом у практиці судноплавства спостерігається стійка тенденція до появи нових типів суден. Оскільки тип судна та його призначення визначають склад суднової енергетичної установки – відповідно можна очікувати змін в ньому. Розвиток морських технологій видобутку вуглеводневих палив зумовив потребу у принципово нових суднах, які забезпечують весь технологічний ланцюг цієї галузі: від розвідки та видобування до переробки та транспортування нафтопродуктів та скрапленого газу. Перехід до промислового використання відновлювальних енергетичних ресурсів – енергії вітру, морських течій, сонячної енергії – забезпечується з допомогою спеціалізованих суден, здатних перевозити великогабаритні грузи та виконувати монтажні роботи. Суттєвих змін зазнали транспортні судна – контейнеровози, танкери, пасажирські та інші. Однак незмінними залишились вимоги до СЕУ – економічна ефективність та екологічна чистота. Тому в суднової енергетиці зберігається постійний інтерес до нових ефективних технологій енергозбереження.

**Ціль роботи** – визначення найбільш раціональних напрямків впровадження термоакустичних технологій в сучасній суднової енергетиці.

**Постановка задачі.** Найбільш поширений тип судових двигунів – двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). Виробники судових ДВЗ, завдяки впровадженню нових технологій та наукових розробок, досягли суттєвих успіхів у підвищенні їх економічності та екологічності. Зараз, для СЕУ сучасних суден пропонуються двигуни, характеристики яких задовольняють вимогам TIER II та TIER III. За таких умов склалась ситуація, коли традиційні схеми утилізації ВЕР на суднах стають малоефективними або економічно недоцільними і стає актуальною задача пошуку нових технологій.

**Розгляд проблеми.** Наявна інформація щодо стану та тенденцій розвитку суднової енергетики свідчить, що в цій галузі доля сталих або безальтернативних рішень постійно зменшується, відповідно з'являється потреба у принципово нових технічних рішеннях [1–3]. Так, все частіше розглядаються варіанти енергетичних установок суден, в яких передбачається використання відновлювальних джерел енергії – вітру, сонячного випромінювання, що в свою чергу відкриває шлях до створення гібридних енергетичних установок. З'являються судна, у складі яких використовуються енергетичні установки на базі паливних елементів, які здійснюють безпосереднє перетворення енергії палива в електричну [4, 5].

Аналіз характеристик сучасних СЕУ з новітніми моделями ДВЗ показує, що змінилися складові теплового балансу головного двигуна та параметри наявних вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) СЕУ. Суттєво зросли температури стислого повітря за турбонагнітачем, зменшились температури відходячих газів. На суднах та в системах СЕУ з'явилися робочі речовини з криогенною температурою (LNG палива та криогенні грузи) (табл. 1).

Відповідні зміни відбуваються і в складі СЕУ. Так, в проектах нових суден все частіше відмовляються від використання утилізаційних парогенераторів та водяної пари як теплоносія. Замість них поширюються утилізаційні системи на базі високо-температурних органічних теплоносіїв – THERMAL FLUID SYSTEMS. Такий підхід потенційно надає нові можливості для вдосконалення характеристик ЕУ суден, суттєво спрощує їх конструкцію, дозволяє запропонувати та реалізувати оригінальні схемні рішення.

Таблиця 1 – Параметри теплоносіїв вторинних теплових ресурсів сучасних суднових ДВЗ

Теплоносій	МОД	СОД	Характеристика ВЕР
	Температура [K]		
Відхідні гази ДВЗ	490–530	500–690	Високотемпературні – температура вище за доквілля
Надувне повітря	400–490	380–470	–
Рідина системи охолодження	355–360	360–370	–
Оточуюче середовище, повітря та забортна вода	298	298	ISO ambient reference conditions
LNG паливо	111	111	Низькотемпературні або криогенні – температура нижча за доквілля
LPG паливо	225	225	–
120/510 Ethylene (груз)	169	169	–

Перспективним напрямом для систем утилізації ВЕР на суднах можна вважати застосування термоакустичних теплових машин (ТАТМ). Термоакустичні апарати – двигуни (ТАД) та рефрижератори (ТАР) – забезпечують пряме перетворення теплової енергії в механічну, і навпаки. ТАТМ суттєво відрізняються від традиційних машин. Оскільки в їх складі відсутні будь-які рухомі механічні елементи, ці апарати мають високу надійність. У ТАТМ не використовуються шкідливі для довкілля речовини. Завдяки конструктивній простоті ТАТМ мають значно меншу вартість в порівнянні з традиційними тепловими машинами, тому вони можуть застосовуватись для утилізації малих обсягів ВЕР.

У практиці суднобудування існують приклади успішного використання термоакустичних рефрижераторів в складі ЕУ фрегату «Deуо» ВМС США. Існують проекти та створені діючі установки скраплення природного газу, які призначені для використання на суднах FPSO рис. 1. В аерокосмічній техніці реалізовані декілька проектів з використанням ТАТМ, це бортові джерела живлення, установки скраплення водню [6–8].

Застосування систем утилізації ВЕР на базі ТАТМ доцільно в разі їх суттєвих переваг над традиційними технологіями або коли їх використання надає судновій енергетичній установці нові якості. Велика перевага ТАТМ – можливість використання ними різних джерел теплової енергії, як високотемпературних, так і низькотемпературних або криогенних. Це питання слід розглянути більш детально.

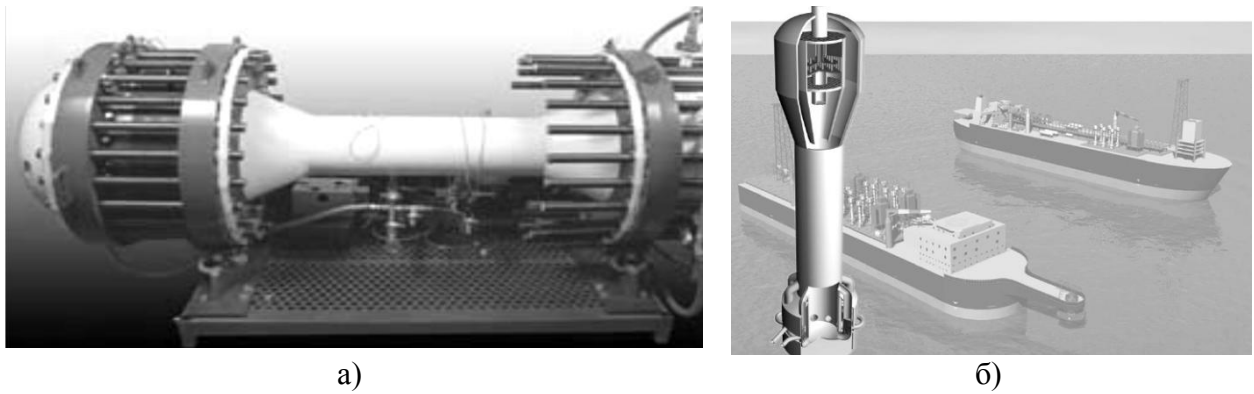


Рис. 1 – а) TAP TRITON система охолодження електроніки фрегата Deyo; б) термоакустична установка скраплення газу для FPSO, (США)

Робота ТАТМ основана на термоакустичному ефекті – самочинному виникненні акустичних пульсацій в газовому середовищі в об'ємі резонатора за наявності необхідного поперечного градієнту температур  $\nabla T_m$  в пористій матриці (стеку) [7, 8]. Цей градієнт у стеку формується за допомогою двох теплообмінників – нагрівача та охолоджувача, скрізь котрі прокачуються відповідні теплоносії (рис. 2).

Поперечний градієнт температури стеку –  $\nabla T_m$  можна визначити як:

$$\nabla T_m = \frac{dT_m(x)}{dx} \approx (T_H - T_L) / L_S. \quad (1)$$

Крім поперечного градієнту  $\nabla T_m$ , важливою характеристикою для термоакустичного процесу є  $\Delta T_{crit}$  – критичний температурний градієнт, який дорівнює:

$$\nabla T_{crit} = \frac{p_1 \omega}{\rho_m c_p u_{s1}}, \quad (2)$$

де  $T_m, p_m, \rho_m, c_p$  – теплофізичні параметри робочого середовища, відповідно – середня температура, тиск, щільність, теплоємність;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота акустичної хвилі;  $p_1$  та  $u_{s1}$  – амплітуди коливань акустичного тиску та коливної швидкості в акустичній хвилі.

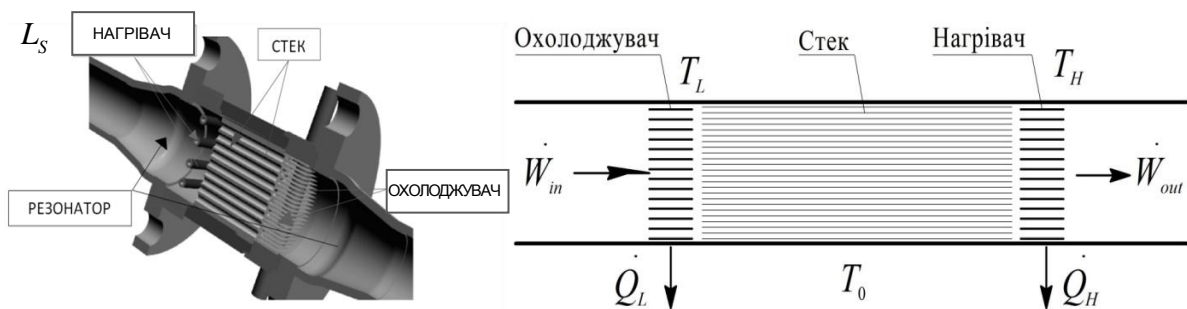


Рис. 2 – Принципова схема модулю термоакустичного перетворювача

ТАТМ працює в якості теплового двигуна, коли виконуються певні умови, а саме температура  $T_H$  перевищує температуру початку самочинних пульсацій  $T_{onset}$ :

$$T_H \geq T_{onset} > T_L \quad (3)$$

та

$$\nabla T_m / \nabla T_{crit} > 1. \quad (4)$$

У разі, коли  $\frac{\nabla T_m}{\nabla T_{crit}} < 1$  ТАТМ працює як рефрижератор, поглинаючи акустичну енергію, а в разі  $\frac{\nabla T_m}{\nabla T_{crit}} > 1$  – ТАД продукує механічну енергію у вигляді акустичної хвилі.

Величини  $\nabla T_{crit}$  та  $T_{onset}$  залежать від багатьох чинників, таких як конструктивні особливості ТАД та термодинамічного циклу, що реалізований в навісному ТАД (цикл Брайтону чи Стірлінгу), матеріалу стеку (регенератору), робочого тиску в резонаторі, фізичних якостей робочого газу, тощо.

В [8] показано, що в термоакустичних перетвореннях, які відбуваються в об'ємі стеку, задіяний так званий повний потік енергії –  $\dot{H}_{2TAD}^{HEX}$ , який, з певними припущеннями, може бути представлений у вигляді

$$\dot{H}_{2TAD}^{HEX} = \frac{1}{4} \Pi \delta_k \frac{\beta T_m p_1 u_{s1}}{(1 + Pr)(1 + \varepsilon_s) \Lambda} \times \left[ \Gamma \frac{1 + Pr^{1/2} + Pr(1 + \varepsilon_s)}{1 + Pr^{1/2}} - \left( 1 + Pr^{1/2} - \frac{\delta_v}{y_0} \right) \right] - \Pi (y_0 k + L k_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (5)$$

Відповідно, акустичну потужність  $\dot{W}_{TAD}$ , яку генерує ТАД, можна розрахувати за допомогою наступного виразу:

$$\dot{W}_{TAD} = \left( \frac{\frac{1}{4} \Pi \delta_k L_s (\gamma - 1) \varpi (p_{s1})^2}{\rho_m a^2 (1 + \varepsilon_s)} \right) \times \left( \frac{\Gamma}{(1 + Pr^{1/2}) \Lambda} - 1 \right) - \frac{1}{4} \frac{\Pi \delta_v L_s \omega \rho_m u_{s1}^2}{\Lambda} \quad (6)$$

Втрати акустичної енергії на поверхні резонатору ТАТМ, радіусом  $R$  та довжиною  $L_{res}$ , можна оцінити, як:

$$E_{diss}^{\bullet} = \frac{1}{4} \frac{(p_{s1})^2}{\rho_m c^2} \omega \pi R L_{res} \left[ \delta_k \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \varepsilon_s)} \left( 1 + \frac{2R}{L_{res}} \right) + \delta_v \right], \quad (7)$$

де  $\Pi, L, L_{res}$  – периметр, довжина стеку та довжина резонатору;  $\delta_s = \sqrt{2\lambda_s / \rho_s c_s \omega}$  – товщина термічного граничного шару в матеріалі стеку;  $\delta_k = \sqrt{2\lambda_k / \rho_m c_p \omega}$  – товщина термічного граничного шару в газі, що контактує зі стінкою;  $\delta_v = \sqrt{2\nu / \omega}$  – величина в'язкісного пограничного шару;  $\Lambda = 1 - \delta_v / y_0 + \delta_v^2 / 2y_0^2$  – масштабний фактор;  $\Gamma = \Delta T_m / \Delta T_{crit}$  – нормалізований градієнт температури.

Наведені вирази свідчать, що потужність ТАД залежить від комплексу теплофізичних параметрів робочого тіла та стеку, геометричних розмірів та температурного градієнту.

Для виникнення акустичних коливань та роботи ТАД суттєвим є повздовжній градієнт температури в матриці –  $\Delta T_m$ , і неважливо, яким чином він формується. Принциповою є лише різниця між температурою нагрівача  $T_H$  та температурою охолоджувача  $T_L$ , температура довкільля не суттєва.

Зрозуміло, що температура джерела теплової енергії  $T_H$  визначається параметрами наявних теплових ресурсів. Нижня температура  $T_L$  в ТАТМ може формуватись як довкіллям, так і іншими теплоносіями, в тому числі і криогенними речовинами.

Аналізуючи матеріальні потоки робочих середовищ сучасних СЕУ з ДВЗ можна визначити джерела вторинної теплової енергії, які потенційно придатні для використання ТАТМ.

Враховуючи досвід експлуатації існуючих суднових систем утилізації ВЕР, можна вважати доцільним прийняти в якості базової схему суднової термоакустичної системи з проміжними теплоносіями, яка показана на рис. 3 [9].

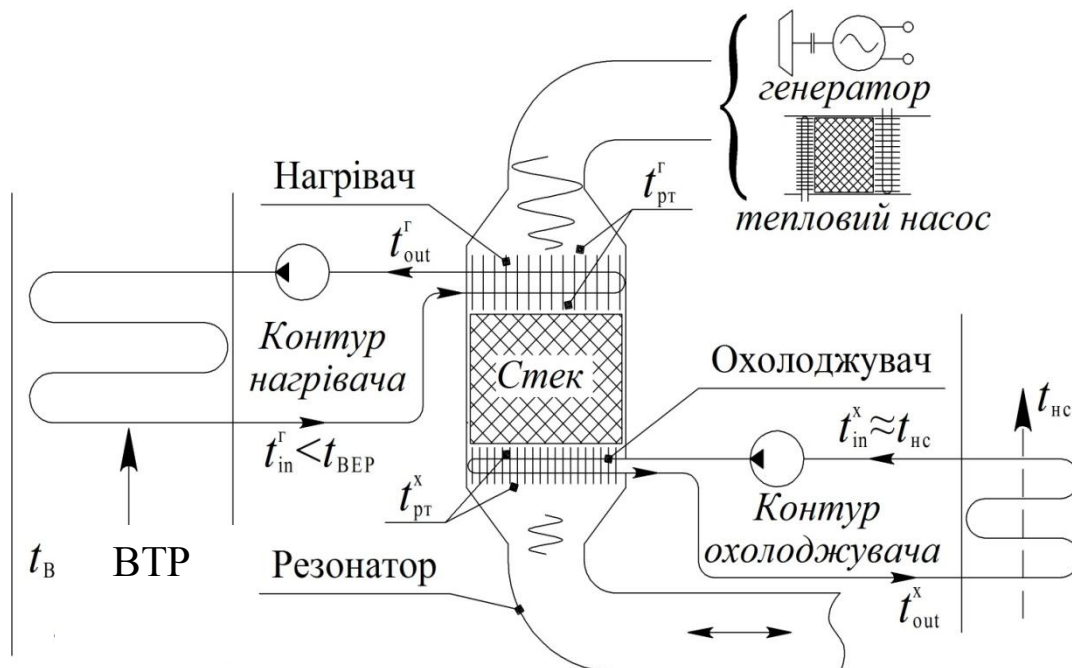


Рис. 3 – Принципова схема системи утилізації ВЕР з допомогою ТАТМ

Використання в системах СЕУ високотемпературних рідкісних теплоносіїв (ВРТ) значно спрощує застосування термоакустичних апаратів і робить цю схему універсальною. Проміжні циркуляційні контури з ВРТ надають змогу ТАТМ працювати у складі систем ЕУ, використовуючи наявні ВЕР, різні за температурними рівнями та складом.

У практиці термоакустики прийнято, що коли в якості стоку теплової енергії розглядається оточуюче середовище, то маємо «heat-source driven thermoacoustic engine – НТЕ», та коли температура стоку значно нижча за температуру довкілля – відповідно маємо «cold-source-driven thermoacoustic engine – СТЕ».

ТАТМ здатні ефективно працювати у складі криогенних систем, оскільки для їх роботи потрібна лише наявність повздовжнього градієнту температури у стеку, при цьому абсолютні значення температур неважливі. Можливість роботи НТЕ ТАТМ була підтверджена експериментально в роботі [10].

Оскільки механічна енергія в ТАТМ існує у хвильовій формі, то найбільш просто її використовувати в ТАР та термоакустичних теплових насосах [11], але існують діючі зразки ТАТМ, які продукують електричну енергію, використовуючи п'єзоперетворювачі або лінійні електрогенератори.

Наявність криогенних теплоносіїв надає змогу запропонувати енергогенеруючу LNG систему паливопідготовки з використанням ТАТМ. Така система є привабливою для таких суден, як LNG танкери та судна з LNG паливами [9] (рис. 4).

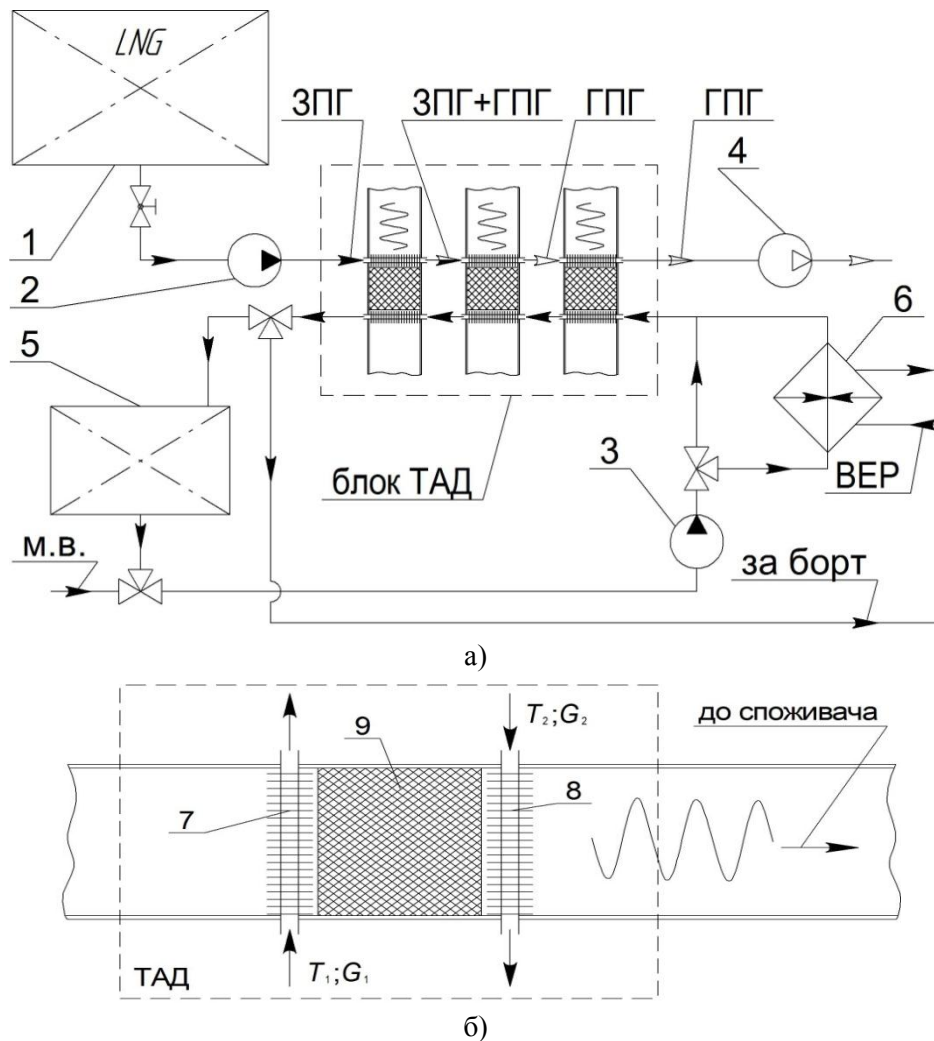


Рис. 4 – Принципова схема системи регазифікації LNG палива:

а) – загальний вигляд, б) – схема ТАД; 1 – ємність з LNG; 2, 3 – насоси; 4 – компресор; 5 – цистерна з прісною водою; 6 – теплообмінник ВЕР двигуна; 7, 8 – теплообмінники, нагрівач та охолоджувач; 9 – стек або регенератор

Сьогодні на судах з LNG паливами застосовується спеціальна система регазифікації, яка забезпечує отримання та подачу газового палива до двигуна. У більшості існуючих систем регазифікації низькотемпературний потенціал криогенного палива практично втрачається.

Для створення енергогенеруючої системи регазифікації пропонується в якості нагрівачів скрапленого газу використати блок низькотемпературних ТАД. Важливо підкреслити, що така схема може бути використана для робочих середовищ з різними температурами, оскільки в ТАТМ в якості робочого тіла використовується гелій, що виключає можливі проблеми, пов'язані з низькими, криогенними температурами на поверхні внутрішніх теплообмінників (8) ТАД.

Потрібний для роботи ТАД градієнт температур забезпечується завдяки різниці в температурі між рідиною системи охолодження ГД (355 – 360 К) – теплообмінник (7) та температурою LNG палива – теплообмінник (8). Завдяки внутрішній незворотності робочого процесу в ТАД температура скрапленого газу, який прокачується скрізь ТАД, буде підвищуватись. У СТЕ ТАД на перших ступенях можуть бути використані теплообмінники з LNG в якості теплоносія, в послідуючих ступенях доцільно застосувати випарні теплообмінники, в яких може бути використана скрита теплота випаровування теплоносія.

**Висновки.** Так, система спроможна утилізувати енергії різних джерел низькопотенційних ВЕР СЕУ – скидну теплоту системи охолодження ГД, теплоту від ОНП ГД та криогенний потенціал LNG палива.

Крім цього, можливість ефективно генерувати потужні акустичні пульсації потенційно надає змогу розробити та впровадити принципово нові рішення для вдосконалення СЕУ та загальносуднових систем.

Відомо, що потужні акустичні хвилі суттєво впливають на перетик багатьох теплофізичних процесів, а саме – інтенсивність тепло і масообміну, значно позначаються на перебігу міжфазних перетворень, сприяють осушенню вологого повітря тощо. Ці явища потребують проведення додаткових детальних досліджень. Результати первинних власних експериментів показали перспективність даного напрямку робіт.

Враховуючи наявний температурний рівень ВЕР сучасних СЕУ, а також потенційні можливості термоакустичних технологій, можна вважати доцільним їх застосування у складі суднових енергетичних установок. Найбільш доцільними можна вважати наступні технічні рішення на базі ТАТМ:

- суднові системи кондиціонування та рефрижерації, системи осушення повітря у спеціальних приміщеннях;
- спеціальні системи охолодження електронних блоків кораблів та суден;
- грузові системи на суднах газозазах;
- паливні системи на суднах з LNG та LPG паливами;
- технологічні системи суден FPSO, системи регенерації технологічних ВЕР шляхом підвищення їх температурного рівня.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Heinrich Schmid, Less Emissions Through Waste Heat Recovery [Електронний ресурс] // Wartsila Corporation, 2004. – Режим доступу : <http://www.wartsila.com>.
2. George Backwell / Korean Car Carrier Puts ‘Garage Roof’ to Productive Use [Електронний ресурс] // [maritimepropulsion.com](http://maritimepropulsion.com) 2012. – Режим доступу : <http://goo.gl/8ruY45>.
3. SUTO Naonori, MINAMI Hiroki Development of Power Supply System with Hybrid Turbocharger for Marine Application // JFE GIHO No. 32 (Aug. 2013), p. 91–94. – Режим доступу: <http://goo.gl/tb7TSU>
4. Jan Fredrik Hansen, John Olav Lindtjørn, Klaus Vänskä Onboard DC Grid for enhanced DP operation in ships // Dynamic Positioning Conference. – Houston, Oct. 11-12, 2011.
5. Rolls-Royce Hybrid shaft generator propulsion system upgrade [Електронний ресурс] // Режим доступу: [http://www.rolls-royce.com/Images/hsg\\_brochure\\_tcm92-26884.pdf](http://www.rolls-royce.com/Images/hsg_brochure_tcm92-26884.pdf)
6. G. W. Swift. Thermoacoustics for liquefaction of natural gas // G. W. Swift and J. J. Wollan, GasTIPS, Volume 8, Number 4, pages 21-26
7. Swift G.W. Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators / G.W. Swift // American Institute of Physics. – 2002. – 300 p.
8. Swift G. W. Thermoacoustic Engines / G.W. Swift // Journal of the Acoustical Society of America. – Vol. 84, No. 4, 1988. – P. 1145–1180.
9. Коробко В. В. Перспективи застосування термоакустичних технологій в системах регазифікації [Електронний ресурс] / Коробко В. В., Московко О. О. // Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції ; НУК, «Суднова енергетика: стан та проблеми». – 2013. – Режим доступу : <http://goo.gl/vHjXvi>.
10. QIU LiMin1 Characteristics of onset and damping in a standing-wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen / QIU LiMin1, LOU Ping1, WANG Kai1, WANG Bo, SUN DaMing1, RAO JunFeng, ZHANG XueJun // Chinese Science Bulletin – 2013., 58 (11): p. 1325-1330.

11. Spoelstra S. Thermoacoustic heat pumps for energy savings [Text] / S. Spoelstra, M.E.H. Tijani // Grensoverschrijdende akoestiek, Nederlands Akoestisch Genootschap, The Netherlands, 2005. – 23 p.

**Коробко В.В. ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ МАШИН В СИСТЕМАХ СЭУ**

*В статье рассмотрены изменения в структуре вторичных энергетических ресурсов СЭУ, которые вызваны использованием современных высокоэффективных двигателей и LNG топлив. Показано, что уменьшение температурных уровней, имеющихся сбросных тепловых ресурсов, и появление криогенных рабочих сред требует внедрения новых технических решений. Термоакустические технологии могут быть использованы в СЭУ для утилизации таких вторичных энергоресурсов. Базовая теоретическая модель термоакустики показывает, что существует принципиальная возможность работы термоакустических машин с использованием низкотемпературных источников сбросной энергии. Предложена универсальная тепловая схема утилизации вторичных энергоресурсов СЭУ с промежуточным высокотемпературным теплоносителем. Для СЭУ с LNG топливами разработана принципиальная схема термоакустической энергогенерирующей системы регазификации криогенного топлива. Технические решения предложенные в работе, могут быть использованы в современных СЭУ для повышения их общей эффективности. Термоакустические технологии потенциально способны обеспечить возможности для совершенствования СЭУ и разработки принципиально новых систем и решений.*

**Ключевые слова:** СЭУ, вторичные энергетические ресурсы, термоакустика, LNG топлива, регазификация, тепловые двигатели.

**Korobko V.V. POSSIBLE USES OF THERMOACOUSTIC HEAT MACHINES IN THE SHIP POWER PLANTS**

*The article deals with changes in the structure of waste energy flows of modern SPP that are associated with the use of modern highly efficient engines and LNG fuels. It is shown that reducing the temperature levels of available waste heat resources, and the appearance of cryogenic working fluids require the introduction of new technical solutions. Thermoacoustic technologies can be used in SPP for disposing low temperature waste heat resources. Thermoacoustic basic theoretical model shows that there is a fundamental opportunity for thermoacoustic machines to work using low-temperature sources of energy relief. A universal scheme of thermal recycling of waste energy SPP with an intermediate high-temperature coolant was also offered. A schematic diagram of the power generating system for cryogenic fuel regasification by thermoacoustic technology adjusting to SPP with LNG fuels was developed. The technical solutions proposed in the paper can be used in present-day SPP to improve their overall performance. Thermoacoustic technology can potentially provide opportunities for improving SPP and developing new innovative systems.*

**Keywords:** ship power plants, waste heat energy, thermoacoustic, heat machine, LNG fuel, regasification.

© Коробко В.В.

Статтю прийнято  
до редакції 30.10.14

УДК 656.61.052

## ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ

*Львов В.Е.*

*Одесская национальная морская академия*

*Определение внешних сил волновой природы представляет сложный теоретико-экспериментальный процесс, а расчетные модели громоздки и обладают значительными неточностями и ограниченностью. Цель исследования состоит в разработке методики учета волновой составляющей внешних воздействий на процесс управления курсом судна. Введение в состав системы управления новых элементов и установление функциональных связей по ветру и волнению, позволяет повысить надежность работы системы, ее быстродействие и экономичность, особенно в штормовых условиях.*

*Включение в контур регулирования устройств расчета угла ветрового и волнового дрейфа и введение их значений в задатчик курса позволяет повысить точность управления по заданному курсу.*

**Ключевые слова:** *волновое воздействие, управление курсом, компенсационное управление.*

**Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными или практическими задачами.** Внешние возмущения на судно формируются в условиях ветра, волнения, течения и воздействия мелководья и определяются его мореходными качествами. Расчетные алгоритмы по учету влияния внешних возмущений на процесс маневрирования представлены не для всех видов возмущений. Проявление внешних возмущений связано с увеличением сопротивления движению, существенным ухудшением управляемости, падением скорости хода, изменением посадки и маневренных свойств судна.

Определение внешних сил волновой природы представляет сложный теоретико-экспериментальный процесс, а расчетные модели громоздки и обладают значительными неточностями и ограниченностью.

По этой причине без достаточной оценки влияния ветра и сопутствующего ему волнения в системе управления курсом судна качество поддержания направления движения остается проблематичным.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работе [1] рассмотрены способы расчета параметров состояния судна при движении в условиях шторма и использование их для выбора режимов движения судна. Однако вопросы расчета воздействия волнения на движение судна не рассмотрены.

В работе [2] приведены теоретические основы формирования сигналов управления на исполнительные органы для управления курсом и процессом маневрирования.

В работе [3] проанализированы принципы построения, теория, моделирование и синтез систем управления широкого класса. Для расчета влияния волнения, основываясь на линейной теории качки, Я. И. Войткунский [3] предложил определять проекции силы от волнения на координатные оси движения судна, следующей зависимостью:

$$R_{\text{вн}} = 0,5 \cdot \rho \cdot L \cdot h_{3\%} \cdot K_{\text{вн}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность морской воды;  $L$  – длина судна между перпендикулярами;  $R_{\text{вн}}$  – поперечная составляющая возмущающих сил от волнения;  $K_{\text{вн}}$  – безразмерный волновой коэффициент, который зависит от размеров судна, длины волны и ее курсового угла;  $h_{3\%}$  – высота волны 3% обеспеченности.

Зависимость между высотой развитого волнения и скоростью истинного ветра предлагается определять соотношениями:

$$\tau = 0,65 \cdot K_E \cdot W_u, \quad \lambda = 1,55 \cdot \tau^2 = 0,655 \cdot K_E^2 \cdot W_u^2, \quad (2)$$

где  $\tau$  – период бега волн;  $\lambda$  – длина волны;  $W_{и}$  – скорость истинного ветра;  $K_E$  – коэффициент роста, для развитого волнения его принимают равным 0,8. Высота волны 3% обеспеченности  $h_{3\%}$  :

$$h_{3\%} = 0,03 \cdot W_{и}^2. \quad (3)$$

С учетом приведенных выражений зависимость (1) представлена как:

$$R_{ey} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot K_{ey} \cdot W_{и}^2 = C_b \cdot W_{и}^2, \quad (4)$$

где  $C_b$  – коэффициент возмущающей силы.

В работах [4, 5] рассмотрены методы адаптивного управления курсом судна при использовании ПИД регуляторов без оценки ветроволновых возмущений.

Работа [6] содержит способы улучшения работы системы управления курсом путем введения в ее состав корректирующего элемента, который по истинным параметрам ветра вырабатывает дополнительное управляющее воздействие  $\delta_k$ , устанавливая рулевой привод на этот угол. В результате интегральная составляющая переходного процесса существенно уменьшается до величины, сравнимой с погрешностью расчета значения угла компенсации. За счет этого уменьшается нагрузка на рулевое устройство в штормовых условиях, производится адаптация системы управления к внешним воздействиям и повышается ее быстродействие. Недостатком такого компенсационного устройства является отсутствие влияния волновой составляющей возмущений.

**Целью статьи** является разработка методики учета волновой составляющей внешних воздействий на процесс управления курсом судна.

**Изложение материала исследования.** При расчете возмущающих сил от волнового воздействия можно использовать два подхода. Первый основан на методике Я. И. Войткунского [3], в которой сила воздействия на судно от волнения рассчитывается по формуле (4). Недостаток такого способа заключается в том, что коэффициент возмущающей силы  $C_b$  определяется по приближенным эмпирическим зависимостям, имеющим существенные ограничения.

В работе [7] приведена методика определения безразмерных коэффициентов волновых сил по пространственным осям X ( $C_x^w$ ), Y ( $C_y^w$ ) и момента  $C_m^w$  по результатам испытаний судов в натуральных условиях и их моделей в бассейне, а также соответствующие эмпирические зависимости:

$$C_x^w = 0,062 \cdot \frac{B}{T} - 0,0085 \cdot \frac{L}{T} + 0,328 \cdot \delta_v, \quad (5)$$

$$C_y^w = 0,0823 \cdot \frac{L}{B} + 2,56 \cdot \frac{T}{L} + 0,903 \cdot \delta_v^2, \quad (6)$$

$$C_m^w = 0,15 \cdot \delta_v + 0,197 \cdot \delta_v^2 - 0,00373 \cdot \frac{L}{T}, \quad (7)$$

где  $B$  – ширина судна;  $T$  – средняя осадка;  $L$  – длина судна по КВЛ;  $\delta_v$  – коэффициент общей полноты судна.

Эмпирические зависимости (5-7) справедливы при изменении главных размеров в следующих диапазонах:

- отношение длины к осадке  $10,0 < \frac{L}{T} < 23,0$ ;
- отношение ширины к осадке  $1,0 < \frac{B}{T} < 3,7$ ;
- отношение длины к ширине  $5,0 < \frac{L}{B} < 12,0$ ;
- коэффициент общей полноты  $0,6 < \delta_v < 0,8$ .

Величины составляющих волновой силы  $X_w, Y_w$  и момента  $M_w$  при нерегулярном волнении определяется по частотному составу последовательности регулярных волн:

$$X_w = C_x^w \cdot (0.1 - \cos q_w) \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot \left(\frac{h_{3\%}}{2}\right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \cdot \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w}\right), \quad (8)$$

$$Y_w = C_y^w \cdot \sin q_w \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot \left(\frac{h_{3\%}}{2}\right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \cdot \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w}\right), \quad (9)$$

$$M_w = C_m^w \cdot \frac{\sin(2 \cdot q_w)}{1 + \frac{\pi - |q_w|}{\pi}} \cdot \rho \cdot g \cdot L^2 \cdot \left(\frac{h_{3\%}}{2}\right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \cdot \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w}\right), \quad (10)$$

где  $q_w$  – курсовой угол бега волн;  $g$  – ускорение свободного падения;  $A_0$  – эмпирический коэффициент, учитывающий соотношение длины волны и судна (рекомендуется принимать  $A_0 = 3,3$ );  $A_1$  – эмпирический коэффициент, учитывающий степень влияния скорости движения судна на силы от волнения  $A_1 \in [1,0; 8,5]$ ;  $\lambda$  – длина регулярной волны;  $V_n$  – составляющая скорости движения судна, направленная вдоль направления бега волн;  $V_w$  – скорость бега волн.

Для выполнения расчетов используется двухпараметрический спектр реального морского волнения [7].

Величина плеча силы волновой природы  $\ell_w$  определяется путем деления (10) на (9), в результате получим:

$$\ell_w = \frac{C_m^w}{C_y^w} \cdot \frac{\sin(2 \cdot q_w)}{2 - |q_w|/\pi} \cdot L. \quad (11)$$

Приведенные выше расчетные зависимости позволяют ввести новые элементы и связи в систему управления курсом судна в штормовую погоду и обеспечить функционирование второго канала компенсационного управления по волновому сопротивлению корпуса.

Введение второго компенсационного канала повышает упрежденность системы при использовании двух пропорциональных сигналов от ветра и волнения отдельно.

Такая схема системы управления курсом судна приведена на рис. 1.

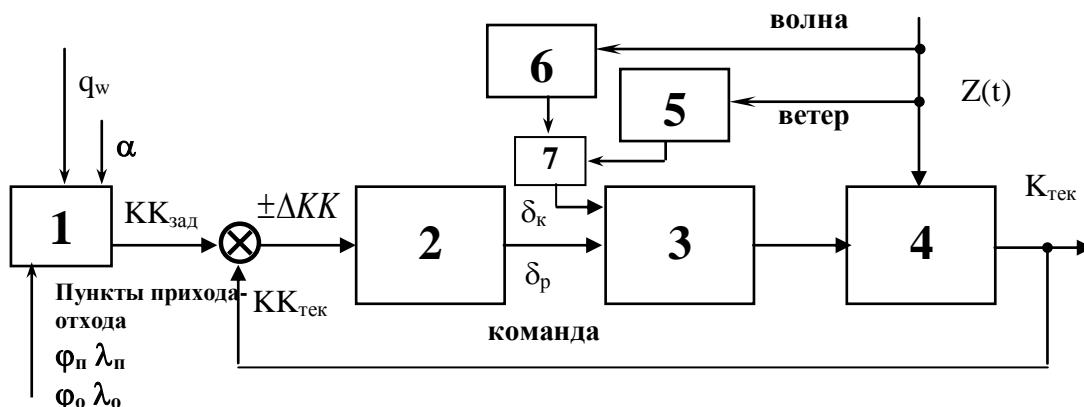


Рис.1 – Схема системы управления курсом судна:

1 – задатчик курса, 2 – информационно-управляющее устройство, 3 – устройство управления, 4 – объект управления. 5 – компенсатор ветрового воздействия, 6 – компенсатор волнового воздействия, 7 – блок расчета угла компенсации для устройства управления

Система управления функционирует следующим образом: по координатам пункта прихода и отхода в блоке 1 определяется  $KK_{зад} = f(\varphi_{п}, \lambda_{п}; \varphi_{о}, \lambda_{о}; \alpha; q_w)$ , значение которого поступает на устройство сравнения. По каналам обратной связи сюда же поступает текущее значение курса  $KK_{мек}$ , и при несовпадении заданного и фактического состояния информационное управляющее устройство вырабатывает команду на средства управления для приведения объекта маневрирования в заданное состояние.

При появлении внешних возмущений включаются два канала компенсационного управления по ветру 5 и по волнению 6. Указанные элементы производят расчет исходных данных для расчета угла компенсации с учетом ветра и волнения. В блок 1 от блоков 5 и 6 поступает значение угла ветрового и волнового дрейфа, которые вводят поправку в  $KK_{зад}$ .

Для уменьшения угла и числа переключений руля был введен корректирующий элемент, который производит вычисление значения угла компенсации  $\delta_{\kappa}$ , по формуле [6]:

$$\delta_{\kappa} = \frac{1 + (2/\lambda_p)}{S_p \cdot \rho} \cdot \left[ \left( 0.25 + \frac{\ell_{\text{шп}}}{L} - \frac{q_w}{360} \right) \cdot 0.37 \cdot \sin q_w \cdot \rho_b \cdot S_{\text{н}} \cdot \frac{W^2}{V_{\text{л}}^2} + \right. \\ \left. + \left( 0.5 + \frac{\ell_{\text{бс}}}{L} - \frac{\alpha}{180} \right) \cdot \frac{0.23 \cdot \sin \alpha + 1.09 \cdot \sin^2 \alpha}{(2.1 \cdot \delta_{\text{он}} - 7 \cdot T/L)^2} \cdot \rho \cdot S_{\text{н}} \right], \quad (12)$$

где  $\lambda_p$  – относительное удлинение руля,  $S_p$  – площадь пера руля,  $\ell_{\text{шп}}$  – отстояние центра парусности от модель-шпангоута,  $L$  – длина судна между перпендикулярами,  $q_w$  – курсовой угол кажущегося ветра,  $\rho_b$  – массовая плотность ветра,  $S_{\text{н}}$  – площадь надводной части корпуса судна на диаметральной плоскости,  $W$  – скорость кажущегося ветра,  $V_{\text{л}}$  – скорость судна по лагу,  $\ell_{\text{бс}}$  – отстояние центра бокового сопротивления от мидель-шпангоута, можно приближенно рассчитать по формуле [6]:

$$\ell_{\text{бс}} = \frac{1 + 2 \cdot T_{\text{н}} / T_{\kappa}}{3 \cdot (1 + T_{\text{н}} / T_{\kappa})} - 0.5, \quad (13)$$

$\alpha$  – угол ветрового дрейфа,  $\delta_{\text{он}}$  – коэффициент общей полноты,  $T$  – средняя осадка,  $T_{\text{н}}$  и  $T_{\kappa}$  – осадка носом и кормой соответственно,  $S_{\text{н}}$  – площадь проекции подводной части корпуса судна на диаметральную плоскость.

Для уточнения расчета угла компенсации  $\delta_{\kappa}$  введен момент от волновой составляющей (10). Тогда формула для расчета совместного угла компенсации от ветра и волнения примет вид:

$$\delta_{\kappa} = \frac{1 + (2/\lambda_p)}{S_p \cdot \rho} \left\{ \left[ \left( 0.25 + \frac{\ell_{\text{шп}}}{L} - \frac{q_w}{360} \right) \cdot 0.37 \cdot \sin q_w \cdot \rho_b \cdot S_{\text{н}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( 0.5 + \frac{\ell_{\text{бс}}}{L} - \frac{\alpha}{180} \right) \cdot \frac{0.23 \cdot \sin \alpha + 1.09 \cdot \sin^2 \alpha}{(2.1 \cdot \delta_{\text{он}} - 7 \cdot T/L)^2} \cdot \rho \cdot S_{\text{н}} \right] + \right. \\ \left. + \left[ C_m^w \cdot \frac{\sin(2 \cdot q_w)}{1 + \frac{\pi - |q_w|}{\pi}} \cdot \rho \cdot g \cdot L^2 \cdot \left( \frac{h_{3\%}}{2} \right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{z}{L}} \cdot (1 + A_1 \frac{V_{\text{н}}}{V_w}) \right] \right\} \quad (14)$$

В компенсаторе 7 предусмотрена оценка потери управляемости, что позволяет своевременно принять меры по ее сохранению.

Для компенсации постоянных воздействий внешних факторов на судно руль переключается на постоянный угол  $\delta_k$ , и для удержания судна на курсе в условиях шторма происходит манипуляция на угол  $\delta_b$  вокруг  $\delta_k$ . Потеря управляемости наступает тогда, когда  $\delta_k + \delta_b > \delta_{max} = 35^\circ$ .

**Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.** Введение в состав системы управления новых элементов и установление функциональных связей по ветру и волнению, позволяет повысить надежность работы системы, ее быстродействие и экономичность, особенно в штормовых условиях.

Включение в контур регулирования устройств расчета угла ветрового и волнового дрейфа и введение их значений в датчик курса позволяет повысить точность управления по заданному курсу.

Повышение точности определения угла компенсации, за счет учета волновой составляющей, позволяет уменьшить нагрузку на рулевую машину и создает условия для оптимизации ее использования в шторм и автоматизации управления судном при движении по криволинейным траекториям.

Результаты могут быть использованы в учебном процессе на старших курсах морских учебных заведений и на курсах повышения квалификации.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородай И. К. Прикладные задачи динамики судов на волнении / И. К. Бородай, В. А. Мореншильдт, Г. В. Виленский. – Л. : Судостроение, 1982. – 288 с.
2. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна / А. Д. Гофман. – Л. : Судостроение, 1988. – 360 с.
3. Лукомский Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов. – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.
4. Пипченко А. Д. Разработка метода адаптивного управления на основе ПИД-регулятора / А. Д. Пипченко // Материалы наук.-техн. конф. «Стан та проблеми судноводіння», 19 окт. 2005 г. – Одесса : ОНМА, 2005. – С. 119-126.
5. Пипченко А. Д. Создание упрощенной математической модели судна, управляемого рулем и винтом / А. Д. Пипченко // Судовождение : сб. науч. тр. ОНМА. – Одесса : Феникс, 2005. – Вып. 9. – С. 75-81.
6. Львов В. Е. Метод улучшения компенсационных свойств системы управления курсом судна / В. Е. Львов // Судовождение : сб. науч. тр. ОНМА. Одесса : Феникс, 2008. – Вып. 15 – С. 109-114.
7. Юрканский А. В. Исследование управляемости судов в условиях ветра и волнения : дис... канд. техн. наук. : 05.08.01 / Юрканский Александр Викторович. – Санкт-Петербург, 2005. – 118 с.

#### **Львов В.С.** ВПЛИВ ХВИЛЬОВОЇ ПРИРОДИ НА СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ КУРСОМ

*Визначення зовнішніх сил хвильової природи представляє складний теоретико-експериментальний процес, а розрахункові моделі громіздкі та мають значні неточності й обмеженість. Мета дослідження полягає в розробці методики обліку хвильової складової зовнішніх впливів на процес управління курсом судна. Введення до складу системи управління нових елементів і встановлення функціональних зв'язків з бурєю й хвилями, дозволяє підвищити надійність роботи системи, її швидкодію та економічність, особливо у штормових умовах. Включення в контур регулювання пристроїв розрахунку кута вітрового і хвильового дрейфу та введення їх значень в заданий курс дозволяє підвищити точність управління судном.*

**Ключові слова:** хвильовий вплив, управління курсом, компенсаційне управління.

**Lvov V.E. THE EFFECT OF WAVE ACTION ON THE SYSTEM MANAGEMENT COURSES**

*Determination of the wave nature of external forces is a complex theoretical and experimental process and simulation models are bulky and have significant inaccuracies and limitations. The purpose of research is to develop methods of accounting wave component of external influences on the management of the ship's heading. The introduction of the management system and the establishment of the new elements of the functional relationships in the wind and the raging, can improve the reliability of the system, its performance and efficiency, especially in storm conditions. Inclusion in the control circuit devices for calculating the angle of wind and wave drift and the introduction of their values in the course of the dial allows you to increase the accuracy of the control at the specified rate.*

**Keywords:** wave action, course management, compensation management.

© Львов В.Є.

Статтю прийнято  
до редакції 5.06.14

## ПРИЧИНЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОЛЮСА ПОВОРОТА

*Товстокорый О.Н.*

*Херсонская государственная морская академия*

*В работе предложено теоретическое обоснование причин и закономерностей изменения положения полюса поворота.*

*При управлении маневрированием обзорно-сравнительным способом оператору кажется, что вращение происходит вокруг него, в то время когда фактически происходит вокруг полюса поворота (ПП). Это приводит к неверной оценке расстояний до ориентиров и создает предпосылки для возникновения аварийной ситуации.*

*Знание причин и закономерностей перемещения ПП позволит достоверно оценить его положение в процессе маневрирования, что, зачастую, является крайне важным, особенно при управлении движением больших парусных судов.*

*Такое знание перемещения ПП может быть использовано на любых судах для повышения точности управления маневрированием при морских операциях.*

**Ключевые слова:** полюс поворота, закономерности изменения положения ПП, вращающий момент судна, безопасность маневрирования.

**Постановка проблемы в общем виде.** При обзорно-сравнительном способе управления судном оператору кажется, что вращение происходит вокруг него, в то время когда фактически происходит вокруг полюса поворота (ПП). В большинстве случаев при таком маневрировании судна прибегают к глазомерной оценке его положения относительно знаков ограждения и руководит приложением управляющих воздействий на основании опыта по управлению конкретным судном и интуиции.

Это приводит к неверной оценке расстояний до ориентиров и создает предпосылки для возникновения аварийной ситуации. Вокруг ПП происходит вращение судна и угол дрейфа в нем равен  $0^0$ . При изменении точки приложения поперечных сил и появления моментов положение ПП изменяется, что существенно влияет на характер маневрирования. Особенно это проявляется при управлении большими парусными судами (БПС), для которых точку приложения поперечных сил корректно определить расчетным способом не представляется возможным. Знание причин и закономерностей перемещения ПП позволит достоверно учесть его положение в процессе управления. Поэтому учет всех факторов, влияющих на положение ПП, и изучение закономерностей его перемещения является актуальным.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работе [1] отмечается, что перемещение ПП зависит от отношения величины лобового сопротивления к движущей силе и направлено в сторону действия этой силы.

В работе [2] показано, что положение ПП зависит от точки приложения равнодействующих боковых сил и предложены формулы для расчета положения ПП для разных вариантов приложения сил.

В работе [3] автор утверждает, что при поворотах судно разворачивается вокруг вертикальной оси (центра вращения), проходящей через центр сил сопротивления.

В работе [4] приведены формулы расчета положения ПП при маневрировании в узкостях при различной ширине занимаемой полосы движения.

В работе [5] усовершенствованы алгоритмы расчета положения ПП при нескольких поперечных силах и получена формализованная модель расчета его положения с индикацией судоводителю на контуре ватерлинии.

В работе [6] приведены содержательные модели оценки положения ПП, полученные на основании личного производственного опыта выполнения практического маневрирования.

В работе [7] показано, что изменение положения ПП при маневрировании парусного судна происходит за счет изменения угла перекладки руля и набора парусов. Однако формализованные модели не приведены.

В работе [8] приведены результаты экспериментального определения ПП по тангенциальным скоростям носа и кормы. Однако ни в одном из источников не указаны причины и закономерности изменения положения полюса поворота.

**Постановка задачи.** Целью данной статьи является попытка теоретического обоснования причин и закономерностей изменения положения полюса поворота.

**Изложение материала исследования.** Для выяснения задачи исследования рассмотрим действие сил и моментов на судно.

Вариант 1. Судно неподвижно относительно воды. На него начинает действовать боковая сила  $F_b$ , приложенная в произвольной точке. Если она приложена на одной линии с положением центра бокового сопротивления (ЦБС), судно получает поступательное движение в сторону действия силы. Если же  $F_b$  приложена в любой другой точке, под ее действием судно начинает совершать сложное движение: боковое смещение в сторону действия силы и вращательное движение относительно какого-то неподвижного центра – полюса поворота (ПП), как рассмотрено в [2] и [4]. Рассмотрим это движение. Вращательное движение происходит благодаря паре сил: боковой  $F_b$  и силе сопротивления воды или гидродинамической силе  $F_c$ . Эта сила приложена в центре бокового сопротивления (ЦБС). Его положение зависит от положения ЦТ, положения ЦВ и полей давления в носу и в корме судна [6]. Мы не будем детально останавливаться на определении положения ЦБС, так как это уже было сделано в [6], а только лишь заметим, что ЦБС обычно находится недалеко от ЦТ, а при загрузке на ровный киль – недалеко от миделя. Согласно [2] можно определить положение ПП по графику зависимости от точки приложения боковой силы, а с помощью [5] – рассчитать положение ПП по формулам в зависимости опять же от положения точки приложения равнодействующей боковых сил. При расположении точки приложения боковой силы вблизи оконечностей судна ПП находится с другой стороны миделя на небольшом удалении от него. При приближении точки приложения боковой силы к миделю ПП удаляется, а при приближении боковой силы к миделю на расстояние, меньшее приблизительно 23 % от длины судна выходит за пределы корпуса. Это следует из графиков в [2] и [5]. Также следует заметить, что при приближении точки приложения к миделю плечо момента сил, разворачивающих судно ( $F_b$  и  $F_c$ ), уменьшается. Следовательно, уменьшается и вращательный момент, действующий на судно. Из этого можно сделать вывод, что при уменьшении вращающего момента ПП отодвигается дальше от миделя, а при увеличении момента – приближается к миделю.

Теперь рассмотрим вариант 2: действие сил и моментов на движущееся судно. Для упрощения задачи возьмем случай, когда судно движется с выключенными двигателями по инерции со скоростью  $V$  с рулем в положении «прямо». На него действуют силы инерции  $F_{ин}$ , приложенная в центре тяжести ЦТ и сила сопротивления воды  $F_c$ . Так как на судно не действуют боковые силы, дрейф равен  $0^\circ$ , то положение плеча гидродинамической силы [2] можно определить согласно формуле (1)

$$\bar{\ell}_c = 0,5 + \frac{\ell_{bc}}{L} - \frac{\alpha^0}{180^\circ}, \quad (1)$$

где  $\ell_{bc}$  – расстояние от центра бокового сопротивления (ЦБС) до миделя;  $\alpha^0$  – угол дрейфа.

Так как дрейфа нет, точка приложения  $F_c$  будет находиться на форштевне (рис. 1).

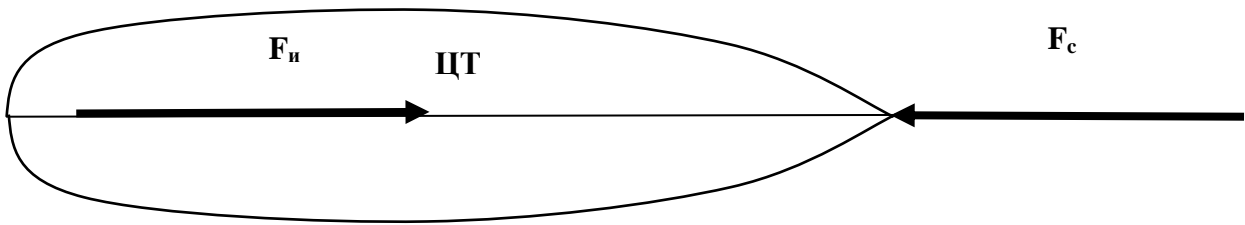
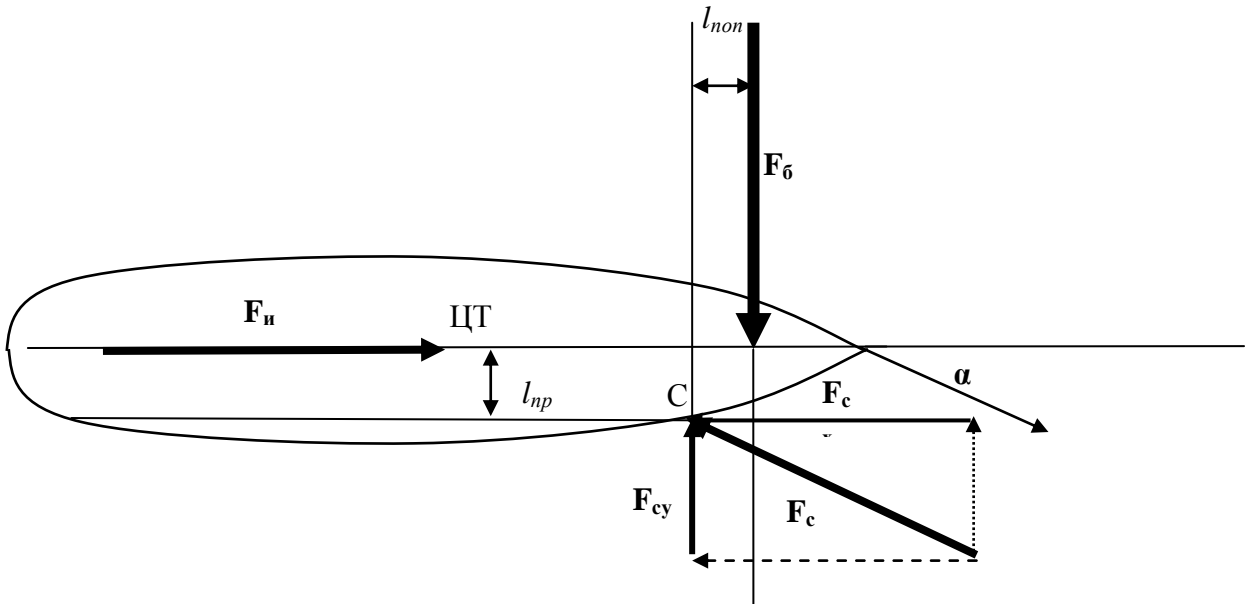


Рис. 1 – Судно движется прямолинейно по инерции

Теперь рассмотрим случай, когда на судно действует боковая сила  $F_b$  (подруливающее устройство, буксир, парус и т.д). В случае нескольких боковых сил рассматриваем их равнодействующую. Точка приложения силы инерции не изменится. А точка приложения гидродинамической силы изменится. Появится угол дрейфа  $\alpha$ , и согласно формуле (1) плечо силы  $F_c$  изменится. Точка приложения будет находиться ближе к миделю. Направление силы тоже изменится, так как она будет параллельна направлению набегающего потока воды. Кроме того сила сопротивления воды будет приложена не к точке на ДП, а к точке С на поверхности обшивки корпуса. Это утверждение рассмотрим как гипотезу. Силу  $F_c$  можно разложить на продольную составляющую  $F_{cx}$  и поперечную составляющую  $F_{cy}$  (рис. 2).


 Рис. 2 – Судно движется по инерции с приложением боковой силы  $F_b$ 

Таким образом, согласно предлагаемой теории, образуются 2 пары сил: пара  $F_n$  и  $F_{cx}$  (плечо  $l_{np}$ ), действующих в продольном направлении и пара  $F_b$  и  $F_{cy}$  (плечо  $l_{non}$ ), действующих в поперечном направлении.

Рассмотрим, каким образом эти пары сил влияют на поведение судна. Момент пары  $F_n$  и  $F_{cx}$  всегда пытается развернуть судно в сторону действия поперечной силы (в нашем случае – по часовой стрелке). Пара  $F_b$  и  $F_{cy}$  может действовать по-разному. Это зависит от взаимного положения сил. В случае, когда  $F_b$  будет находиться ближе к оконечности судна, чем  $F_{cy}$ , момент этой пара сил будет пытаться развернуть судно в том же направлении, что и пара продольных сил (рис. 3).

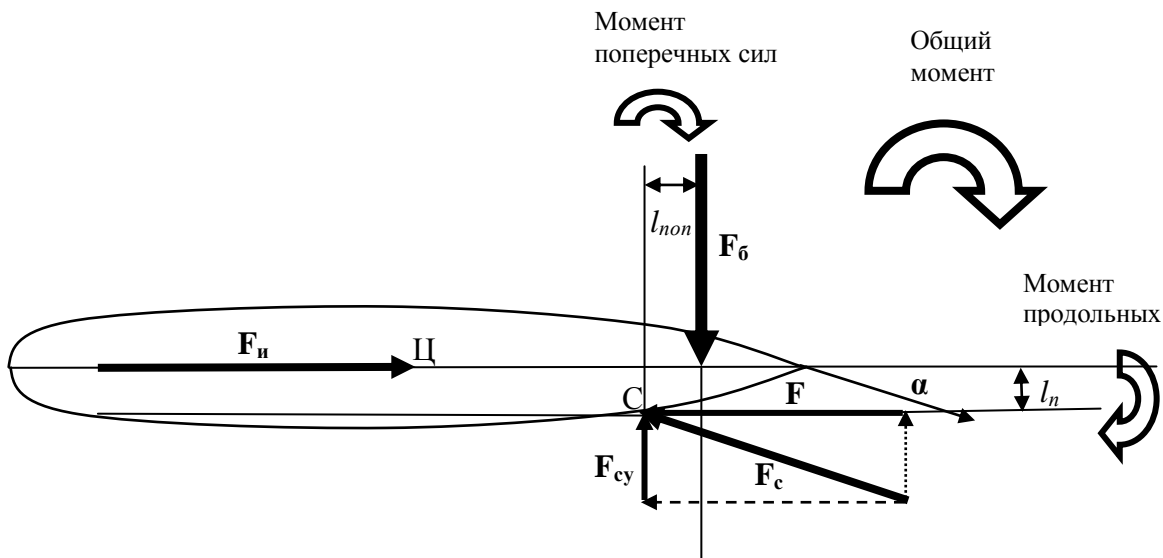


Рис. 3 – Судно движется по инерции с приложением боковой силы  $F_b$ , точка приложения которой находится ближе к оконечности судна, чем точка приложения гидродинамической силы сопротивления  $F_c$

В случае же, когда  $F_b$  будет находиться дальше от оконечности судна, чем  $F_{cy}$ , момент этой пары будет пытаться развернуть судно в противоположном направлении (в нашем случае против часовой стрелки) (рис. 4).

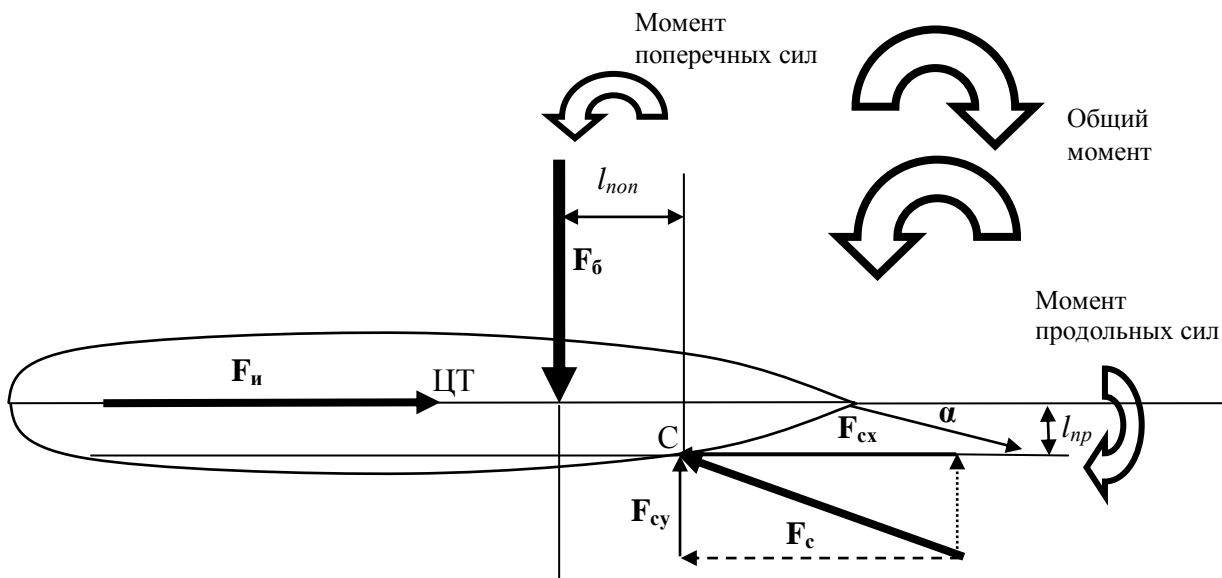


Рис. 4 – Судно движется по инерции с приложением боковой силы  $F_b$ , точка приложения которой находится дальше от оконечности судна, чем точка приложения гидродинамической силы сопротивления  $F_c$

Куда будет пытаться развернуться судно, то есть, куда направлен общий вращательный момент, будет зависеть от суммы (в случае одинакового направления) или разности (в случае противоположно направленных) моментов продольных и поперечных сил. А эти моменты уже будут зависеть от соотношения сил и положения точки приложения боковой силы. В общем случае вместо силы инерции следует рассматривать равнодействующую всех продольных сил, направленных в сторону движения судна, вместо боковой силы – равнодействующую всех боковых сил.

Что касается положения ПП, то оно так же, как и при неподвижном судне, будет зависеть от общего вращающего момента. При большом вращающем моменте ПП будет находиться недалеко от миделя, а при малом моменте – на большом от него расстоянии со

стороны миделя, противоположной от точки приложения боковой силы. Это все происходит в соответствии с предлагаемой теорией.

Это можно проиллюстрировать примерами. Так, следует рассмотреть примеры маневров ППС «Running on waves» под парусами [8]. Некоторые из них плохо объясняются классической теорией.

Интересны эксперименты 15, 15/1. В этих экспериментах движение происходит вперед по инерции, положение руля «прямо», а затем ставится парус на баке (бом-кливер или летучий кливер). Ветер дует слева. Боковая сила возникает за счет давления ветра на парус. В эксперименте 15 ставился бом-кливер ( $41\text{ м}^2$ , отстояние ЦП от миделя + 24,21 м), а в эксперименте 15/1 – летучий кливер ( $96\text{ м}^2$ , отстояние ЦП от миделя + 27,02 м).

В эксперименте 15 после постановки паруса курс судна за 120 секунд изменился не вправо, а влево с  $003^\circ$  до  $346^\circ$ . После замены бом-кливера на летучий кливер момент боковой силы был увеличен за счет увеличения площади паруса и увеличения плеча силы.

В результате в эксперименте 15/1 курс изменился вправо с  $004^\circ$  до  $012^\circ$ . Это подтверждает, что точки приложения боковой силы (силы давления ветра на парус) и гидродинамической силы сопротивления воды находятся очень близко друг от друга и при небольшом изменении точки приложения боковой силы вращательный момент изменил направление на противоположное.

Теперь рассмотрим положение полюса поворота в данных случаях. Так как расстояние между линиями действия сил, то есть плечо, мало, то и момент, создаваемый боковой силой мал. А это значит, полюс поворота должен отстоять далеко от миделя. Действительно, в эксперименте 15 положение полюса поворота на протяжении эксперимента менялось от 692 м до 1773 м относительно миделя, а в эксперименте 15/1 – от 2570 м до 1998 м. Столь большое различие в результатах объясняется тем, что замеры производились каждые 10 секунд (в течение 120 секунд – 13 замеров), ветер в любом случае менялся, следовательно, менялась и боковая сила, а от нее – и момент поперечных сил. Момент продольных сил зависел только лишь от скорости судна, а она за это время почти не изменялась.

Эксперимент 21. В этом эксперименте судно двигалось назад по инерции, ветер был слева. Боковая сила создавалась ветром в поставленный крьюйс–стенг–стаксель ( $120\text{ м}^2$ , отстояние центра парусности от миделя –  $7,67\text{ м}^2$ ). При движении назад судно должно было уваливаться кормой под ветер, т.е. нос должен был идти на ветер – влево. В эксперименте нос пошел вправо с  $342^\circ$  до  $25^\circ$ . Это объясняется тем, что точка приложения боковой силы находилась ближе к миделю, чем точка приложения гидродинамической силы. Поэтому пара поперечных сил стремилась вращать судно по часовой стрелке, а пара продольных – против. Так как скорость судна была невелика и все время уменьшалась (от 2,2 до 1,3 узла), то момент поперечных сил был больше момента продольных и общий момент разворачивал судно по часовой стрелке. Кроме того сказалось то, что парус начал работать вперед и гасить скорость заднего хода. Но момент оставался небольшим и положение полюса поворота менялось от 22,8 м до 142,5 м вперед от миделя (среднее значение +68,83 м).

**Выводы.** Гидродинамическая сила сопротивления воды приложена к точке на обшивке корпуса и в общем случае продольная составляющая силы сопротивления воды направлена не ПО ДП, а параллельно ей. По мнению автора, положение полюса поворота зависит от величины и знака суммарного вращательного момента судна: чем момент больше, тем ППС ближе к миделю и наоборот. Знак определяет, в какую сторону от миделя расположен ППС. При движении судна общий вращательный момент судна зависит от суммы или разности моментов продольных и поперечных сил, действующих на судно.

При движении парусного судна вперед для эффективного поворота судна под ветер необходимо приложить воздействие, приводящее к созданию сильного вращающего момента в нужном нам направлении, для того, чтобы судно увалилось.

Предложенная теория требует подтверждения и детальной проработки. Поэтому эксперименты и исследования по данной теме следует продолжить.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генри Г. Хойер. Управление судами при маневрировании / Генри Г. Хойер. Перевод с английского. – М. : Транспорт, 1992. – 101 с.
2. Управление судном / С. И. Демин, Е. И. Жуков и др. – М. : Транспорт, 1991. – 359 с.
3. Шарлай Г. Н. Управление морским судном / Г. Н. Шарлай. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2009. – 503 с.
4. Павельев А. Д. Определение положения полюса поворота и его учет при маневрировании судна ; дис. ... канд. техн. наук. – Режим доступа к источнику : <http://www.dissercat.com/content/opredelenie-polozheniya-polyusa-povorota-i-ego-uchet-pri-manevrirovanii-sudna-0>
5. Голиков В. В. Алгоритм определения положения полюса поворота морского судна / В. В. Голиков, С. Э. Мальцев // Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2013. – № 1(8). – С. 21-27.
6. Capt. Hugues Cauvier. The Pivot Point / The PILOT №295. October 2008. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilot Association.
7. G. Andy Chase. Sailing Vessel Handling and Seamanship-The Moving Pivot Point / The Northern Mariner/Le Marin du nord, IX, No. 3 (July 1999), 53-59.
8. Товстокорый О. Н. Экспериментальное определение положения полюса поворота по тангенциальным скоростям носа и кормы / О. Н. Товстокорый // Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал – Херсон : Видавництво ХДМА, 2014. – № 1(10). – С. 57-63.

### **Товстокорый О.М.** ПРИЧИНИ ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПОЛЮСУ ПОВОРОТУ

*У роботі запропоновано теоретичне обґрунтування причин та закономірностей змінення положення полюсу повороту.*

*Під час керування маневруванням оглядово-порівнювальним способом оператору здається, що обертання відбувається навколо нього, в той час, коли воно фактично відбувається навколо полюсу повороту (ПП). Це призводить до невірної оцінки відстаней до орієнтирів та створює передумови для створення аварійної ситуації.*

*Знання причин та закономірностей переміщення ПП достовірно оцінити його положення у процесі маневрування, що вкрай важливо, особливо під час керування великими вітрильниками.*

*Таке знання переміщення ПП може бути використаним на будь-яких суднах для підвищення точності маневрування під час виконання морських операцій.*

**Ключові слова:** полюс повороту, закономірності змінення положення ПП, обертаючий момент судна, безпека маневрування.

### **Tovstokoryi O.** REASONS AND CONSISTENT PATTERNS OF CHANGING OF POSITION OF PIVOT POINT

*This article deals with the theoretical justification of reasons and consistent patterns of the pivot point position changing.*

*Due to application of comparative method during ship handling it may seem to the operator that the vessel rotates around him, although in reality the vessel rotates around the pivot point (PP). It can lead to false distance assessment to landmarks and cause an emergency.*

*The awareness of reasons and consistent patterns of PP position changing will allow to assess his position during maneuvers. This quite often becomes essential, especially during maneuvers of big sailing ships.*

*Such knowledge of the PP position changing can be adjusted to any ships in order to increase accuracy of ship handling during operations at sea.*

**Keywords:** pivot point, reasons and consistent patterns of PP position changing, turning momentum of the vessel, safety of navigation.

© Товстокорый О.М.

Статтю прийнято  
до редакції 28.10.14

УДК 621.438

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА В ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБИННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

*Чередниченко А.К.*

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев*

*В данной статье обсуждается эффективность применения термохимической регенерации сбросного тепла в энергетических комплексах, приводятся некоторые результаты исследований в этой области. Основной целью исследования является укрупненный анализ взаимосвязей термодинамических параметров газотурбинной установки с термохимической регенерацией теплоты и характеристик двигателя внутреннего сгорания, который работает на продуктах конверсии. При математическом моделировании процессов эффективность конверсии оценивалась коэффициентом увеличения теплоты сгорания. Затраты тепла отходящих газов, необходимых для осуществления конверсии топлива, определены тепловым балансом термохимического реактора. В качестве критерия эффективности установки принят удельный расход топлива. Проведен анализ температурных потенциалов сбросного тепла среднеоборотного дизельного двигателя и газотурбинного двигателя. Предложена схема комбинированной дизель-газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов путем паровой конверсии углеводородного топлива и определена ее эффективность при работе на разных топливах. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании энергетических установок стационарных и мобильных объектов. Установлено, что для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных газотурбинных двигателей разработанная схема установки наиболее эффективна для этанола и бутана.*

**Ключевые слова:** конверсия топлива, газотурбинный двигатель, этанол, термохимическая регенерация тепла, теплота сгорания топлива, удельный расход топлива.

**Постановка проблемы.** Энергетические комплексы разнообразного назначения и конструктивного исполнения являются основой существующей «машинной» цивилизации. Упования на то, что при смене «индустриальной» экономики на «информационную» энергетические затраты общества существенно снизятся не имеют под собой никаких оснований. Потребности человечества в энергии для обеспечения самых разнообразных потребностей постоянно возрастают и будут возрастать. По данным, которые приведены в INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2013 [1] за последующие 30 лет (2010–2040 годы) прогнозируется увеличение мирового потребления энергии более, чем на 50 %.

Основная часть энергии добывается из невозобновляемого источника – углеводородного органического топлива, добыча которого все усложняется и, в свою очередь, требует все возрастающих энергозатрат.

Для снижения зависимости экономики от постоянно растущих цен на ископаемое углеводородное топливо, развитые страны мира развивают альтернативную энергетику, основанную на возобновляемых источниках энергии. Однако развитие технологий применения возобновляемых источников энергии и ядерной энергетики далеко не в полной мере будет компенсировать потребности человечества в энергоносителях на ближайшие десятилетия.

Потребителями ископаемого углеводородного топлива являются в той или иной мере все страны мира. География добычи тоже весьма широка – в «нефтяной клуб» входит более 100 стран. В современном мире цены на углеводородные топлива определяются на биржах из соотношения спроса и предложения, при учете влияния других факторов (политических, финансовых, технологических, состояния запасов и пр.) [2]. При этом цены ископаемых углеводородных топлив постоянно растут, что приводит к снижению эффективности энергетических установок вследствие высокой топливной составляющей общих затрат. Применение альтернативных топлив также удорожает процесс производства энергии.

В таких условиях повышение эффективности процессов преобразования энергии топлива в энергетических комплексах на базе тепловых двигателей является важной и актуальной задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** Исчерпание технических резервов повышения эффективности тепловых двигателей привело к стабилизации во времени величин их термического КПД.

Применение более энергоэффективных двигателей, сдерживается как существенным увеличением стоимости жизненного цикла двигателя при повышении степени его термодинамического совершенства, так и жесткими требованиями экологических стандартов, выполнение которых приводит к значительному увеличению затрат, связанных с энергопотреблением.

Современные подходы к проектированию энергетического оборудования предусматривают различные пути повышения эффективности, в том числе утилизацию и регенерацию сбросного тепла тепловых двигателей и установок, применение комбинированных установок.

Применительно к газотурбинным технологиям, утилизация тепла отходящих газов может осуществляться в регенеративных ГТД различного конструктивного исполнения, но наибольшее распространение получили когенерационные установки и хорошо известные в стационарной и судовой энергетике комбинированные газопаротурбинные циклы. В таких установках предусматривается утилизация тепла отходящих газов ГТД в паротурбинном контуре. В когенерационных установках эффективность теплогенерирующего контура тем выше, чем ниже эффективность теплового двигателя, при этом тепловая мощность может в два раза превышать вырабатываемую механическую (электрическую) мощность. Снижения расходов на водоподготовку и увеличения срока службы котла-утилизатора для таких установок можно достичь применением промежуточного водо-водяного теплообменника, при этом обеспечивается циркуляция воды, нагреваемой в котле утилизаторе по замкнутому контуру. Более перспективным видом промежуточного теплоносителя в когенерационных установках, может быть не вода, а термостойкие (диатермические) масла. Такой теплоноситель допускает достаточно высокие рабочие температуры (до 320 °С при использовании органических масел, и до 400 °С для синтетических масел), исключает проблемы связанные с химводоподготовкой, деаэрацией, подпиткой конденсата. Следует отметить, что температура отходящих газов современных серийных газотурбинных двигателей, применяемых в стационарной и судовой энергетике лежит в пределах 420...520 °С, что может ограничивать применение диатермических масел при утилизации тепла отходящих газов ГТД. Альтернативой может быть применение жидкометаллических теплоносителей [3].

В последние годы в стационарных и мобильных энергетических комплексах на базе ДВС получили распространение установки цикла DCC (Diesel Combined Cycle), в которых предусматривается утилизация тепла отходящих газов ДВС в паротурбинном цикле. Так фирма MAN Diesel&Turbo реализовала подобную схему на ряде дизель-паротурбинных электростанций. Примером может служить установка, в состав которой входит 11 ДВС 18V48/60 суммарной мощностью около 144 МВт и 1 утилизационная паровая турбина мощностью 12 МВт. За счет применения цикла DCC КПД увеличился на 3,7 % и составил 48,4 % [4].

Применительно к судовой и стационарной энергетике на базе малооборотных дизельных двигателей фирмами MAN Diesel&Turbo и Wärtsilä разработаны установки, которые работают с турбокомпаундной системой, а также установки комбинированного цикла (DCC) с турбокомпаундной системой. В таких установках предусматривается утилизация тепла масла двигателя, тепла водяной системы охлаждения рубашки двигателя и водяных контуров охлаждения наддувочного воздуха.

Одним из перспективных способов внедрения энергосберегающих технологий и использования альтернативных видов топлива, позволяющим не только улучшить экономические и экологические характеристики, но и кинетические показатели процесса сгорания, является термохимическая регенерация тепла (ТХР). При этом предусматривается конверсия базового углеводородного топлива, в результате которой образуется синтез-газ — смесь монооксида углерода и водорода, а необходимая энергия для осуществления эндотермической реакции химического превращения топлива получена при утилизации тепла отходящих газов двигателя.

**Цель работы.** Эффективность термохимической конверсии зависит от возможности топлива при заданном температурном диапазоне разлагаться на газообразные продукты. В свою очередь, эффективность термохимической регенерации определяется потенциалом тепла отходящих газов теплового двигателя.

Целью данного исследования является оценка возможности эффективной термохимической регенерации тепла отходящих газов газотурбинного двигателя, работающего в составе комбинированной дизель-газотурбинной установки.

**Изложение основного материала.** Представляет интерес анализ температурных потенциалов сбросного тепла таких основных энергетических машин, как среднеоборотный дизельный двигатель (СОД) и газотурбинный двигатель.

На рис. 1 сопоставлен потенциал сбросного тепла ГТД и СОД сравнимой мощности.

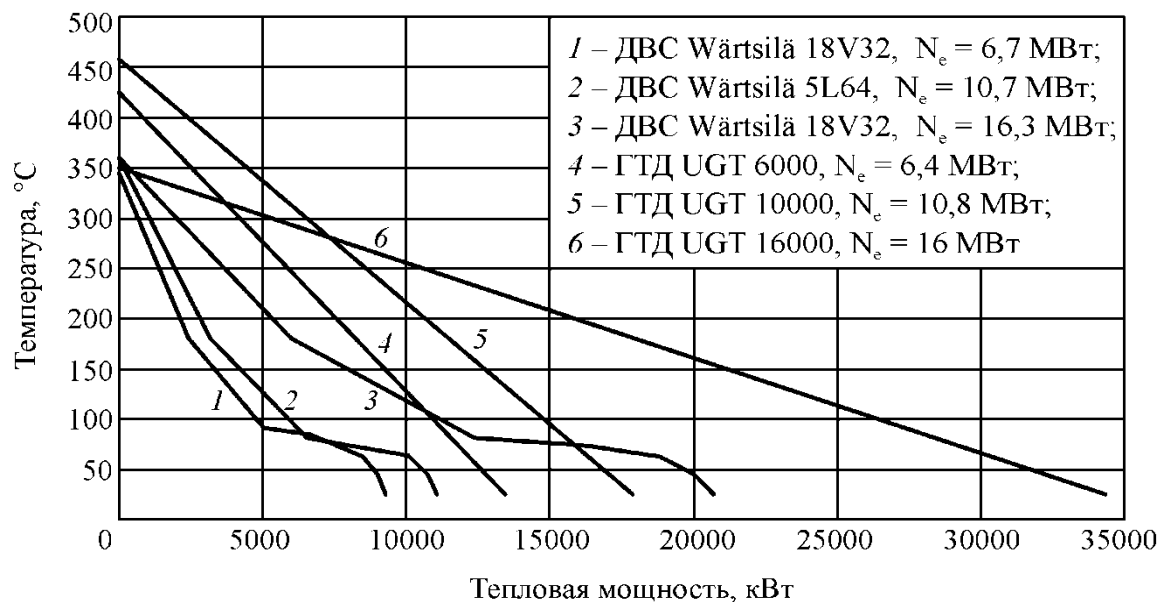


Рис. 1 – Зависимость между температурой теплоносителей и тепловой мощностью сбросного тепла для ГТД и СОД

Перспективность использования того или иного типа углеводородного топлива при термохимической регенерации может быть проанализирована по зависимости разницы теплотворной способности продуктов конверсии  $H_U^K$  и исходного топлива  $H_U^B$  от температуры реакции  $T$ . Расчет выполнен с использованием констант равновесия основных реакций при давлении 0,1 МПа. Результаты расчета обработаны методом регрессионного анализа для располагаемого диапазона температур и представлены в виде зависимостей  $\Delta H_U = f(T)$ , где  $\Delta H_U = H_U^K - H_U^B$ .

Получены следующие зависимости:

- этанол

$$\Delta H_U^o = (2,3272241 \cdot 10^{-10}) \cdot T^5 - (3,2939725 \cdot 10^{-7}) \cdot T^4 + (1,8092345 \cdot 10^{-4}) \cdot T^3 - 0,048113 \cdot T^2 + 6,231876 \cdot T - 315,9218822;$$

- бутан

$$\Delta H_U^B = (2.5375724 \cdot 10^{-11}) \cdot T^5 - (5.1313053 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4 + (3.9415367 \cdot 10^{-5}) \cdot T^3 - 0.0142466 \cdot T^2 + 2.4429205 \cdot T - 159.9790408;$$

- пропан

$$\Delta H_U^P = (5.9146684 \cdot 10^{-14}) \cdot T^6 - (1.2891662 \cdot 10^{-10}) \cdot T^5 + (1.1009637 \cdot 10^{-7}) \cdot T^4 - (4.7002096 \cdot 10^{-5}) \cdot T^3 + 0.0106758 \cdot T^2 - 1.2291116 \cdot T + 56.2031142;$$

- этан

$$\Delta H_U^{ЭТ} = (1.3438138 \cdot 10^{-14}) \cdot T^6 - (2.9040517 \cdot 10^{-11}) \cdot T^5 + (2.2812194 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4 - (7.7418685 \cdot 10^{-6}) \cdot T^3 + (9.9878204 \cdot 10^{-4}) \cdot T^2 + 0.0169935 \cdot T - 9.44105;$$

- метан

$$\Delta H_U^M = -(6.0197345 \cdot 10^{-18}) \cdot T^7 + (2.5780853 \cdot 10^{-14}) \cdot T^6 - (4.4700353 \cdot 10^{-11}) \cdot T^5 + (4.0253939 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4 - (2.0191104 \cdot 10^{-5}) \cdot T^3 + 0.0056732 \cdot T^2 - 0.830873 \cdot T + 49.1241714;$$

Полученные зависимости в дальнейшем использовались при математическом моделировании процессов в комбинированной установке с термохимической регенерацией тепла. Сопоставление результатов расчета и анализ потенциалов сбросного тепла ГТД и СОД позволяет сделать вывод, что для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных ГТД (до 450 °С) эффективна конверсия этанола, бутана, пропана и этана. Тепловой потенциал вторичных энергоресурсов ДВС дает возможность умеренной конверсии этанола, но не позволяет эффективно осуществить конверсию других углеводородов.

На рис. 2 представлена схема комбинированной дизель-газотурбинной установки (ДГТУ) с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД путем паровой конверсии углеводородного топлива, в рассматриваемом случае - биоэтанола.

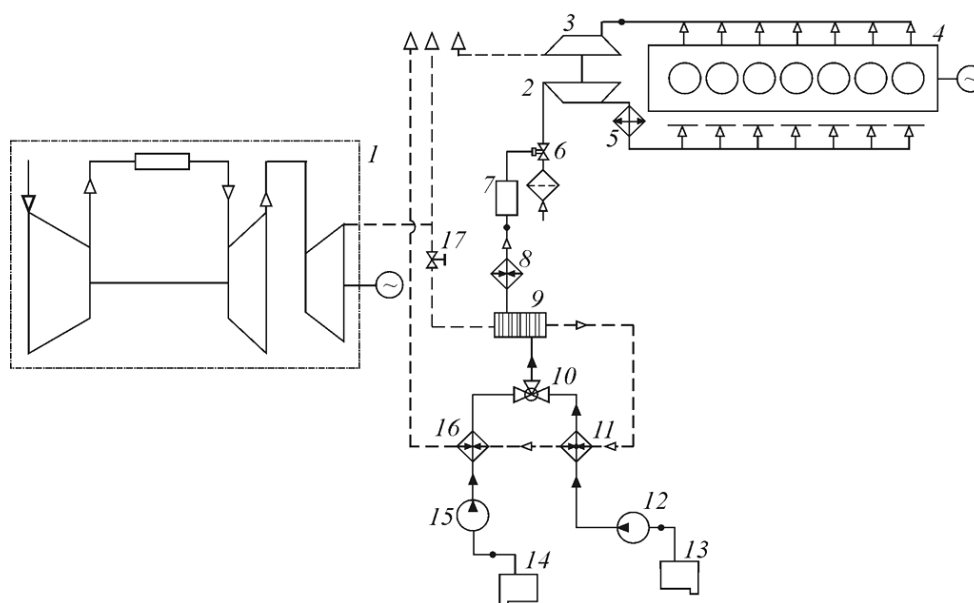


Рис. 2 – Схема ДГТУ с ТХР:

1 – ГТД; 2 – компрессор ТНА; 3 – турбина ТНА; 4 – ДВС; 5 – охладитель наддувочного воздуха; 6 – электромагнитный клапан; 7 – нейтрализатор; 8 – охладитель синтез газа; 9 – термохимический реактор; 10 – смеситель; 11 – испаритель воды; 12, 15 – насосы воды и этанола, соответственно; 13, 14 – резервуар с водой и этанолом, соответственно; 16 – испаритель этанола; 17 – клапан перепуска отработавших газов

Вода и этанол в необходимых пропорциях подается насосами (12, 15) из резервуаров (13, 14) в испарители (11, 16). В испарителях под действием тепла отработавших газов ГТД (1) происходит последовательно нагрев, испарение и перегрев до температуры начала реакции паровой конверсии. Образующиеся пары этанола и воды смешиваются в смесителе (10) и поступают в реактор (9). Под действием тепла отработавших газов ГТД, протекающих в межтрубном пространстве реактора ТХР, происходит реакция конверсии с образованием водородосодержащего газа. Затем синтез-газ поступает в теплообменник (8), где охлаждается до необходимой температуры. Водородосодержащий газ после охладителя поступает в нейтрализатор  $\text{CO}_2$  (7), откуда уже чистый водород впрыскивается через электромагнитный клапан (6) на вход в компрессор ТНА (2) и дальше вместе с воздухом подается непосредственно в цилиндры ДВС (4).

Укрупненный анализ взаимосвязей термодинамических параметров газотурбинной установки с термохимической регенерации теплоты и характеристик ДВС, который работает на продуктах конверсии углеводородного топлива, базируется на положениях, предложенных автором в работе [5].

Изменение низшей располагаемой теплотворной способности топлива в результате эндотермической реакции конверсии учтено посредством коэффициента увеличения теплоты сгорания [5]:

$$\bar{H}_U = \frac{H_U^K - H_U^B}{H_U^B}.$$

Затраты тепла отходящих газов, необходимые для осуществления конверсии топлива определены тепловым балансом термохимического реактора [5]:

$$\frac{\bar{H}_U \cdot H_U^B \cdot C_N \cdot Ne}{3600} = \Delta T \cdot G_T \cdot c_p,$$

где  $G_T$  – расход отходящих газов ГТД;  $c_p$  – средняя массовая изобарная теплоемкость отходящих газов в соответствующем температурном диапазоне;  $\Delta T = f(G_T, c_p, \bar{H}_U)$  – снижение температуры отходящих газов, необходимое для осуществления конверсии топлива.

Максимальная допустимая температура эндотермической реакции конверсии топлива  $T_p$  определена соответственно как:

$$T_p = T_4 - \Delta T,$$

где  $T_4$  – температура газа за ГТД.

В качестве критерия эффективности установки принят удельный расход топлива  $C_N$ , кг/(кВт·час).

Методами математического моделирования исследованы характеристики газотурбинной установки на базе газотурбинного двигателя с термохимической регенерацией тепла отходящих газов (рис. 3).

Было проанализировано изменение удельного расхода топлива ДВС, при его работе в составе комбинированной дизель-газотурбинной установки (ДГТУ) с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД (рис. 4). При моделировании рассматривались установки на базе газотурбинного двигателя UGT 2500 («Зоря»–«Машпроект») мощностью  $N_e^{ГТД} = 2,8$  МВт и среднеоборотных двигателей Wärtsilä 18V32, 5L64, 18V46.

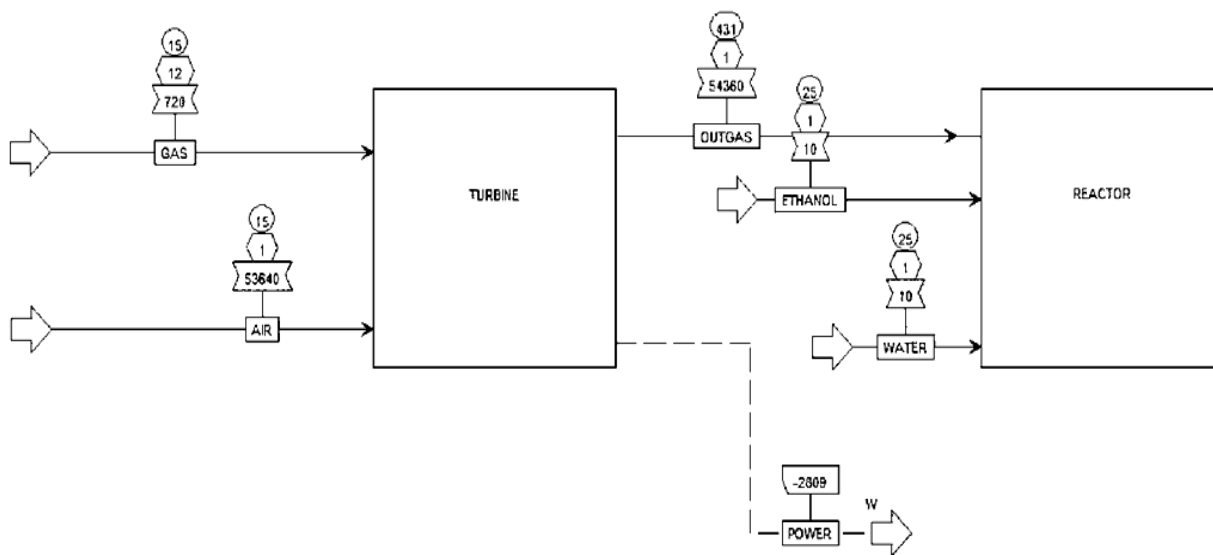


Рис. 3 – Блок-схема газотурбинной установки с ТХР

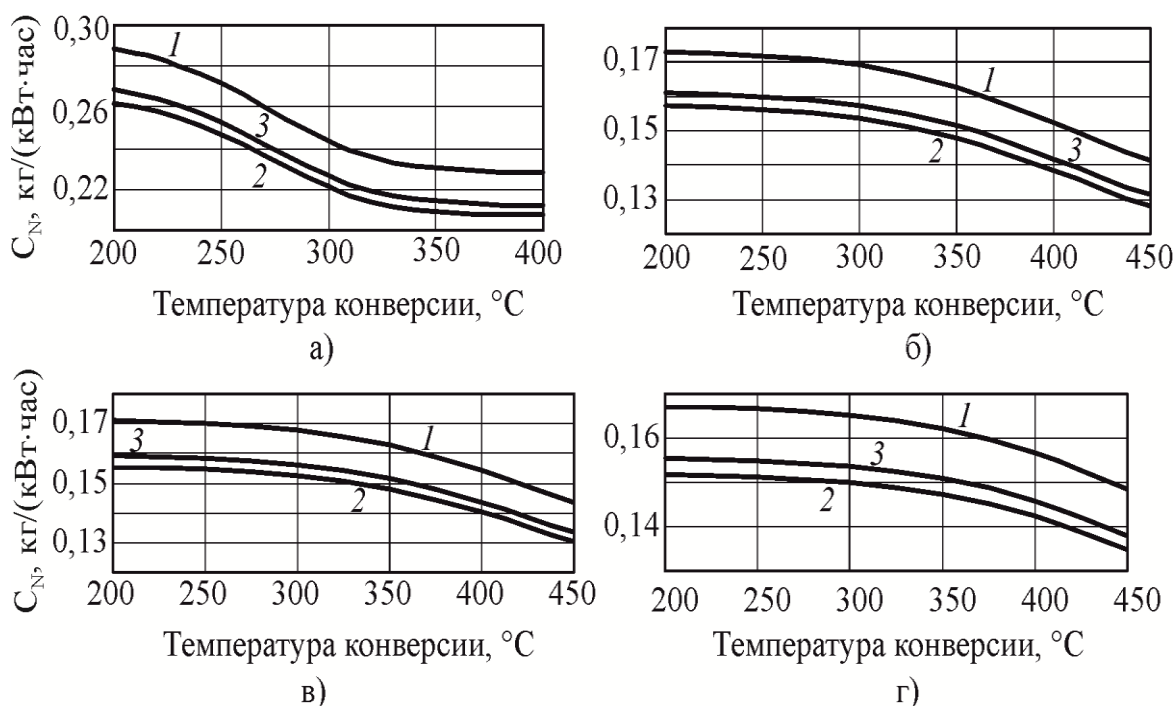


Рис. 4 – Зависимость удельного расхода топлива ДВС (1 - Wärtsilä 18V32, 2 - Wärtsilä 5L64, 3 - Wärtsilä 18V46) при работе в составе ДГТУ с ТХР от температуры конверсии.

Конверсируемое топливо: а) этанол; б) бутан; в) пропан; г) этан

Как видно из полученных зависимостей (рис. 4), при температуре отходящих газов соответствующих номинальному режиму работы УГТ 2500 (~450 °С) возможна эффективная конверсия этанола и бутана (снижение удельного расхода топлива 20 и 18 % соответственно). Менее эффективна термохимическая регенерация тепла отходящих газов ГТД при конверсии пропана и бутана (16 и 12% соответственно).

Преыдущие исследования [5] показали, что конверсия метана в данном диапазоне температур неэффективна (3%).

Расчеты показывают, что теплового потенциала отходящих газов УГТ 2500 достаточно, для получения объема синтез-газа необходимого для работы ДВС Wärtsilä 18V46. Отношение мощностей дизельного и газотурбинного двигателя  $N_e^{ДВС} / N_e^{ГТД}$  при этом составляет  $\approx 6$ . Уменьшение удельного расхода топлива для ДВС Wärtsilä 18V46 составляет для этанола (биоэтанола) до 60 г/(кВт ч), бутана до 30 г/(кВт ч), пропана до 26 г/(кВт ч), этана до 18 г/(кВт ч).

**Выводы**

1. Для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных ГТД наиболее эффективна конверсия этанола и бутана.
2. Математическое моделирование характеристик дизель-газотурбинной энергетической установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД путем конверсии углеводородного топлива позволяет сделать вывод о возможности снижения расхода топлива ДВС до 20%.
3. Потенциал сбросного тепла газотурбинного двигателя может обеспечивать эффективную конверсию углеводородного топлива при отношении мощностей ДВС и ГТД до 6.
4. Дальнейшие исследования ДГТУ с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД могут быть направлены на определение эффективности утилизации и регенерации сбросного тепла ДВС, работающего на продуктах конверсии углеводородного топлива.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. International energy outlook 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf).
2. Брагинский О. Б. Цены на нефть : история, прогноз, влияние на экономику [Текст] / О. Б. Брагинский // Российский Химический Журнал. – 2008. - Т. LII, № 6. - С. 25-36.
3. Ткач М. Р. 2011 : К выбору параметров промежуточного теплоносителя регенеративного газотурбинного цикла / М. Р. Ткач, А. К. Чередниченко // Вестник двигателестроения. – 2011 – № 2 – С. 101-105.
4. MAN Diesel & Turbo Power Plants Programme 2013/14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.mandieselturbo.com](http://www.mandieselturbo.com).
5. Ткач М. Р. Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией тепла отходящих газов [Текст] / М. Р. Ткач, А. К. Чередниченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7(64). – С. 19-22.

**Череди́ченко А.К. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОХІМІЧНОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛА В ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБІННІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ**

*У даній статті обговорюється ефективність застосування термохімічної регенерації скидного тепла в енергетичних комплексах, наводяться деякі результати досліджень у цій області. Основна мета дослідження – розширений аналіз взаємозв'язків термодинамічних параметрів газотурбінної установки з термохімічною регенерацією теплоти і характеристик двигуна внутрішнього згоряння, що працює на продуктах конверсії. При математичному моделюванні процесів ефективність конверсії оцінювалася коефіцієнтом збільшення теплоти згоряння. Витрати тепла відхідних газів, необхідних для здійснення конверсії палива визначені тепловим балансом термохімічного реактора. Як критерій ефективності установки прийнята питома витрата палива. Проведено аналіз температурних потенціалів скидного тепла середньообертового дизельного двигуна і газотурбінного двигуна. Запропоновано схему комбінованої дизель-газотурбінної установки з термохімічною регенерацією тепла відхідних газів шляхом парової конверсії вуглеводневого палива. Визначена їх ефективність під час роботи на різних паливах. Результати досліджень можуть бути використані під час проектування енергетичних установок стаціонарних та мобільних об'єктів. Встановлено, що для температурного діапазону відхідних газів сучасних серийних газотурбінних двигунів, схема установки найбільш ефективна для етанолу та бутану.*

**Ключові слова:** конверсія палива, газотурбінний двигун, етанол, термохімічна регенерація тепла, теплота згоряння палива, питома витрата палива

**Cherednichenko A.K. EVALUATION OF EFFICIENCY OF THERMOCHEMICAL HEAT RECOVERY IN DIESEL-GAS TURBINE POWER PLANT**

*This article discusses efficiency of thermochemical heat recovery of waste heat in energy complexes. Some results of research have been shown. The main aim of the research is the enlarged analysis of interrelations of thermodynamic properties of gas turbine plant with the thermochemical heat recovery and internal-combustion engine specification which operates on the conversion of fuel. At the mathematic simulation the efficiency of conversion was estimated with the magnification factor of the calorific value. The heat balance of the thermochemical reactor determined the heat input of exhaust gases. The specific fuel oil consumption was resolved as the efficiency criterion of the unit. The analysis of the temperature potentials of waste heat of the medium speed diesel engine and gas turbine engine is provided. A scheme of combined diesel-gas turbine power plant with the thermochemical heat recovery of exhaust gases with the steam conversion of hydrocarbon fuel is considered. The efficiency of this scheme in operation on different fuels is determined. The results of research may be used in the development of power plants of mobile and stationary facilities. It is determined that the ethanol and butane conversion is the most effective for the disposable temperature range of exhaust gases of modern commercial gas turbine engines.*

**Keywords:** conversion of fuel; gas turbine engine, ethanol, thermochemical regeneration, fuel calorific value, specific fuel oil consumption

© Чердніченко А.К.

Статтю прийнято  
до редакції 28.10.14

УДК 621.363:621.313

## СУДНОВИЙ ВІТРОГЕНЕРАТОР КОЛИВАЛЬНОГО ТИПУ

*Штанько О.Д., Літвінова М.Б.*

*Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова*

*Розроблено вітрогенератор коливального типу, котрий можна встановлювати на судні. Запропоновано крило гнучкої конструкції, яке дозволяє працювати генератору в автоколивальному режимі, а також конструкція стопорів і направляючих відповідних оптимальній роботі генератора.*

**Ключові слова:** вітрогенератор, автоколивальний режим, крило, кут атаки.

**Постановка проблеми.** Енергія вітру відноситься до поновлюваних видів енергії. Її головна перевага – використання місцевих джерел. На цей час загальна енергія всіх вітроенергетичних пристроїв у світі складає близько 2 % всієї виробленої людством електричної енергії [1]. З урахуванням територіальних особливостей, вітроенергетика може внести суттєвий вклад у енергетичну незалежність України не тільки на суші, а й на морі.

Паралельно з розвитком потужних вітроустановок розвивається напрямок створення вітроустановок середньої потужності. Це генератори коливального типу. Ефективність їх порівняно із класичними істотно вище при досить малих розмірах. Саме вони можуть бути прикладом використання альтернативних джерел енергії у суднобудуванні і стати основою подальшої розробки конструкції суднового вітрогенератора.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зареєстровано багато патентів на конструкції вітроенергетичних установок (ВЕУ) і методику одержання енергії, особливо – конструкцій вітроколів (ВК) [2, 3]. Усі ВЕУ підрозділяються за двома типами: ті, що використовують піднімальну силу вітру і ті, що використовують його силу опору. До першого типу відносяться ВЕУ з використанням піднімальної сили крила. Вони переважають у світовій вітроенергетиці, тому що можуть розвивати лінійну швидкість кінця лопаті (яка збігається з напрямком дії піднімальної сили вітру) значно більшу, ніж швидкість вітрового потоку [2]. Такі ВЕУ, у свою чергу, можуть бути класифіковані за орієнтацією вісі обертання ВК і за положенням ВК щодо всієї конструкції [4]. Установки з вертикальною віссю обертання позбавлені проблеми орієнтування на вітер. Вони одержали визнання за рахунок низької стартової швидкості (1–2 м/с), але не широко поширені через низький ККД вітро-ротора (15–18 %). Класичний представник – вітрогенератор Дар'є [4]. Більш поширені вітро-турбіни (пропелери) з горизонтальною віссю обертання. Класичний представник – крильчатий вітрогенератор [4]. Але роглянуті типи ВЕУ мають суттєві недоліки, що заважають їх використанню на судні. А саме: великий діаметр лопатей ВЕУ, високі вібраційні та шумові характеристики.

Умовам використання на судні найбільш відповідає вітрогенератор коливального типу. Існує низка проектів коливальних вітрогенераторів [3]. При їх використанні, як правило, підбирається найбільш оптимальний режим роботи крила шляхом зміни кута його атаки. Це дає можливість одержати більше значення коефіцієнта використання вітру, ніж у попередніх типах вітрогенераторів. Швидкість, з якої починається рух крила може бути менше 1 м/с, завдяки чому використовується низькоенергетична складова вітру. Тому існує виграш у загальній кількості енергії, отриманої від вітру. У вітчизняній літературі практично не зустрічається інформація про такий режим роботи вітрогенератора. Судячи з іноземних джерел, ККД використання може досягти 70–80 % [4]. За умови малих розмірів ВЕУ для використання на судні потужність одного такого генератора складатиме декілька одиниць кВт.

**Мета статті** – розробка суднового вітрогенератора коливального типу при використанні зміни форми крила з оптимальною конфігурацією.

**Викладення основного матеріалу.** У розробленому вітрогенераторі використовується крило у прямому його призначенні – створенні піднімальної сили і використанні вітрової енергії, що створила цю силу. Піднімальна сила і лобовий опір крила залежать від геометричних характеристик крила за його планом та профілем. Знання про розподіл сил щодо центру тиску може допомогти в одержанні максимальної піднімальної сили і регулюванні переходу в різні режими роботи вітрогенератора.

**Переміщення центру тиску крила при зміні кута атаки.** При зміні кута атаки змінюється розподіл тиску за профілем крила [5, 6], і тому центр тиску переміщується уздовж хорди несиметричного профілю, як показано на рис. 1. Наприклад, при негативному куті атаки  $\alpha$ , що приблизно дорівнює  $-4^\circ$ , сили тиску в носовій і хвостовій частинах профілю  $Y_1$  і  $Y_2$ , відповідно, спрямовані у протилежні сторони і рівні (рис. 1,  $\alpha=-4^\circ$ ). Цей кут атаки називається кутом атаки нульової піднімальної сили. При трохи більшому куті атаки сили тиску, що спрямовані нагору, більше сили, спрямованої до низу. Їх рівнодіюча  $Y$  буде спрямованою за більшою силою (рис. 1,  $\alpha=-1^\circ$ ), тобто центр тиску виявиться розташованим у хвостовій частині профілю. При подальшому збільшенні кута атаки місце, де існує максимальна різниця тисків зміщується ближче до носу крила, що, природно, викликає переміщення центру тиску за хордою до переднього краю крила (рис. 1,  $\alpha=0-15^\circ$ ).

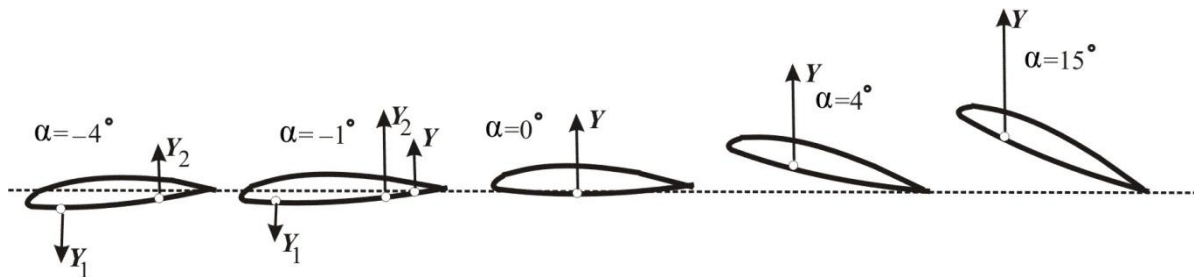


Рис. 1 – Переміщення центру тиску крила при зміні кута атаки

**Поляра крила.** На рис. 2 надано залежність, яка називається полярою [7].

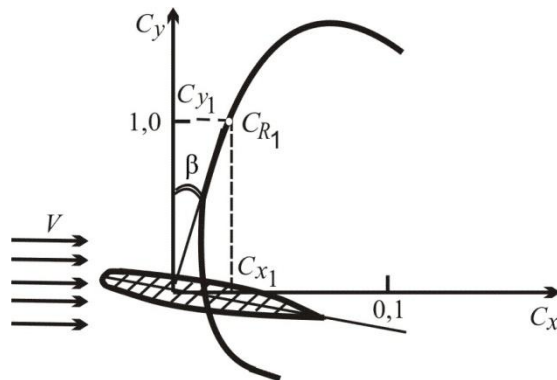


Рис. 2 – Принцип побудови поляри крила

Назва «поляра» пояснюється тим, що цю криву можна розглядати як полярну діаграму, побудовану на координатах коефіцієнта повної аеродинамічної сили  $C_R$  і  $\varphi$ , де  $\varphi$  – кут нахилу повної аеродинамічної сили  $R$  до напрямку швидкості потоку, що набігає (за умови, якщо масштаби  $C_y$  і  $C_x$  взяті однаковими). Для різних розрахунків характеристик крила особливо важливо знати одночасну зміну  $C_y$  і  $C_x$  в діапазоні різних кутів атаки. Для побудови поляри крило (або його модель) продувається у аеродинамічній трубці при різних кутах атаки. При продувці для кожного кута атаки аеродинамічними вагами заміряються величини піднімальної сили  $Y$  і сили лобового опору  $X$ , а потім обчислюють їхні аеродинамічні коефіцієнти. З формули піднімальної сили і сили лобового опору [7] знаходимо:

$$C_y = \frac{Y}{\frac{\rho \cdot v^2}{2} S} \text{ і } C_x = \frac{X}{\frac{\rho \cdot v^2}{2} S}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – питома вага повітря;  $v$  – швидкість повітря;  $S$  – площа крила.

Найвигідніший кут атаки ( $\alpha_{\text{найв}}$ ) – це такий, при якому аеродинамічна якість крила є максимальною. Кут між віссю  $C_y$  і дотичною, проведеною з початку координат (кут якості  $\beta$ ), на куті  $\alpha_{\text{найв}}$  буде мінімальним. Тому для визначення  $\alpha_{\text{найв}}$  потрібно провести з початку координат дотичну до поляри. Точка торкання буде відповідати  $\alpha_{\text{найв}}$ . Для сучасних крил  $\alpha_{\text{найв}}$  лежить у межах 4–6°.

**Носок, що відхиляється.** Носок, що відхиляється, (рис. 3) застосовується на крилах з тонким профілем і гострою передньою крайкою для запобігання зриву потоку за передньою крайкою на більших кутах атаки [6, 8]. Змінюючи кут нахилу рухливого носка, можна для будь-якого кута атаки підібрати таке положення, коли обтікання профілю буде безвідривним. Це дозволить поліпшити аеродинамічні характеристики тонких крил на великих кутах  $\alpha$  атаки. Аеродинамічна якість при цьому може зростати. Викривлення профілю відхиленням носка підвищує  $C_{Y \text{ макс}}$  крила без істотної зміни критичного кута атаки.

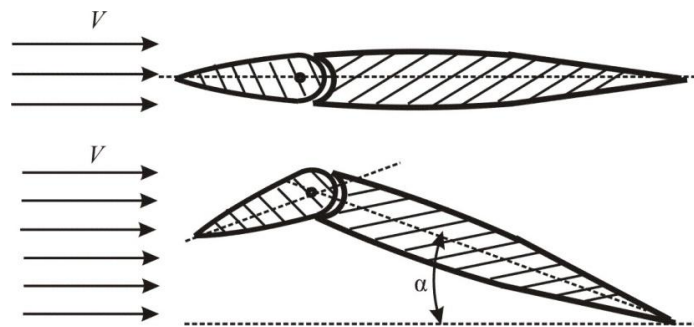


Рис. 3 – Носок крила, що відхиляється

**Розробка принципу роботи крила вітрогенератора.** Передбачається застосування носків і закрилків крила для регулювання напрямку піднімальної сили. «Нульове» положення крила, коли не виробляється енергія підйому, показано на рис. 4 а. При положенні закрилків на рис. 4 б, піднімальна сила спрямована вгору, а при положенні на рис. 4 в – вниз. У запропонованому механізмі регулювання відбувається лінійне переміщення вгору (рис. 4 б) і донизу (рис. 4 в) під дією піднімальної сили.

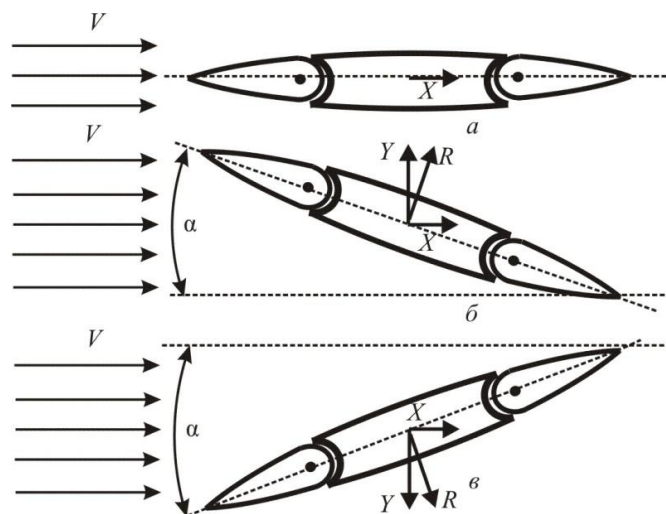


Рис. 4 – Основні положення крила вітрогенератора:  
а – нейтральне положення; б – підйом крила; в – опускання крила

Розглянемо підйом крила. У перехідному стані першою дією передбачається перекид кута носка на негативний щодо хорди центральної частини крила. При цьому піднімальна сила передньої частини (щодо кріплення крила) крила зменшується. За рахунок цього змінюється співвідношення моментів. Крило продовжує підніматися і виходить до точки, де кріплення крила дозволяє йому обертатися у вертикальній площині. За рахунок цього змінюється співвідношення моментів і крило вирівнюється і опускається горизонтально (рис. 5 а) із закріпленням його положення. Після цього закрилки переводяться під негативний кут щодо хорди центральної частини крила. У результаті цієї дії відбувається як би зсув площини хорди на  $180^\circ$ , або зміна напрямку піднімальної сили на протилежний. Далі відбувається опускання крила.

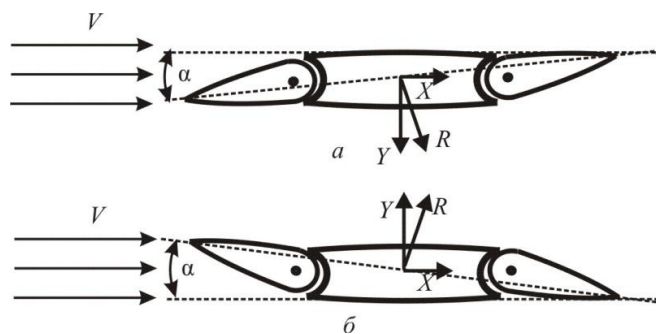


Рис. 5 – Перехідний стан крила: а – у верхньому положенні; б – у нижньому положенні

Розглянемо опускання крила. У перехідному стані першою дією передбачається перекид кута носка на позитивний щодо хорди центральної частини крила.

При цьому піднімальна сила передньої частини (щодо кріплення крила) крила зменшується. За рахунок цього змінюється співвідношення моментів. Крило продовжує опускатися і виходить до точки, де кріплення крила дозволяє йому обертатися у вертикальній площині. За рахунок цього змінюється співвідношення моментів і крило вирівнюється і опускається горизонтально (рис. 5 б). При цьому відбувається опускання всього крила і закріплення його положення. Потім закрилки переводяться під негативний кут щодо хорди центральної частини крила. У результаті цієї дії відбувається як би зсув площини хорди на  $180^\circ$ , або зміна напрямку піднімальної сили на протилежний. Далі відбувається підйом крила.

**Розробка принципу кріплення і зміни руху крила.** Прив'язку напрямку закрилків і носків пропонується забезпечити за допомогою магнітних засувок. Прив'язка проводиться тільки в одному положенні – нейтральному (рис. 4 а). Принцип кріплення показаний на рис. 6. При цьому рухливі сталеві вставки у вихідному стані притягнуті одна до одної і разом з магнітами утворюють замкнуте магнітне коло. При цьому потрібно прикласти істотне зусилля для розриву такого кола, що практично не має щілини. Після розриву закрилки (носок) вільно обертатимуться навколо своєї осі.

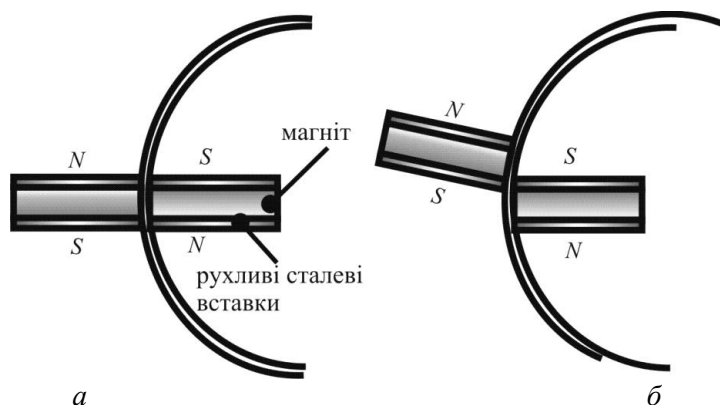


Рис. 6 – Конструкція фіксатора положення закрилок і носка крила:  
а – у нейтральному стані; б – у рухливому стані

Після додавання напрямних зусиль під дією напору вітру закрилки (носок) вертаються і засувки проходять одна поблизу одної, сталеві вставки з'єднуються. При цьому фіксується їхнє нейтральне положення.

**Розробка принципового пристрою зміни напрямку руху крила.** Вимоги до цього пристрою є такими, що забезпечують наступне:

- поворот носка крила з нульового кута на негативний (рис. 7 а, б) або з нульового на позитивний (рис. 8 а, б) щодо хорди при підході до верхньої або нижньої межі, відповідно;
- поворот центральної частини крила у напрямку носка при підйомі (рис. 7 в) або опусканні (рис. 8 в);
- поворот носка у напрямку центральної частини з переходом руху крила на протилежний (рис. 7, 8 г);
- повернення положень носка і закрилків у нейтральне положення (рис. 7, 8 д).

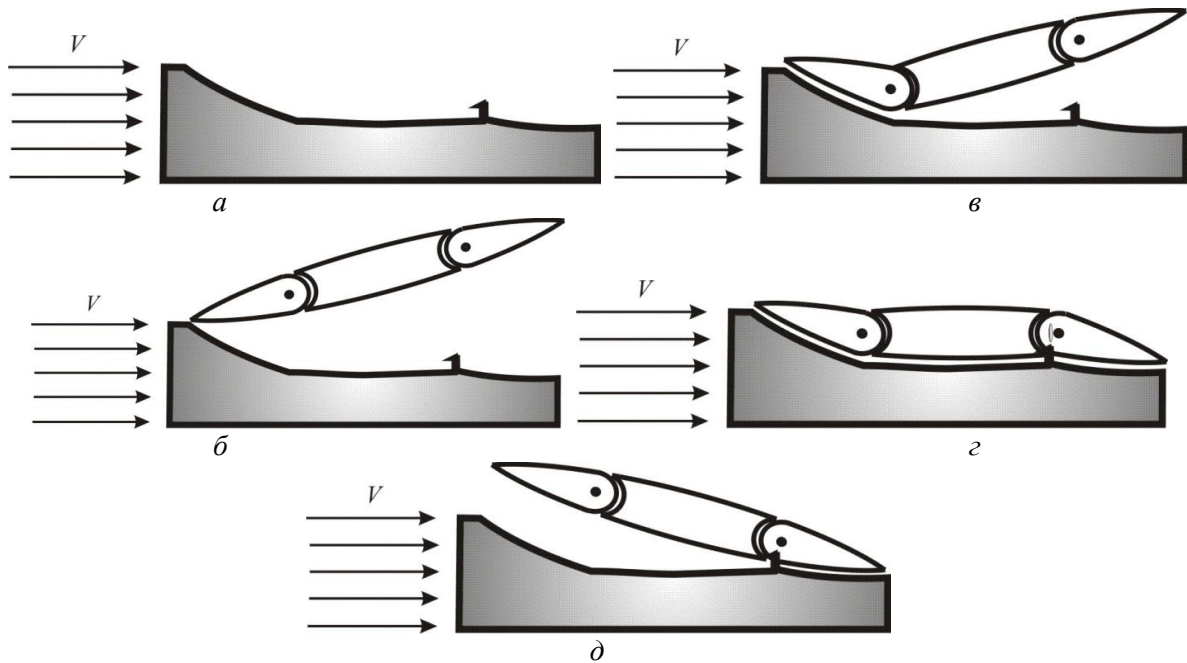


Рис. 7 – Проект нижнього стопора і процес зміни напрямку крила

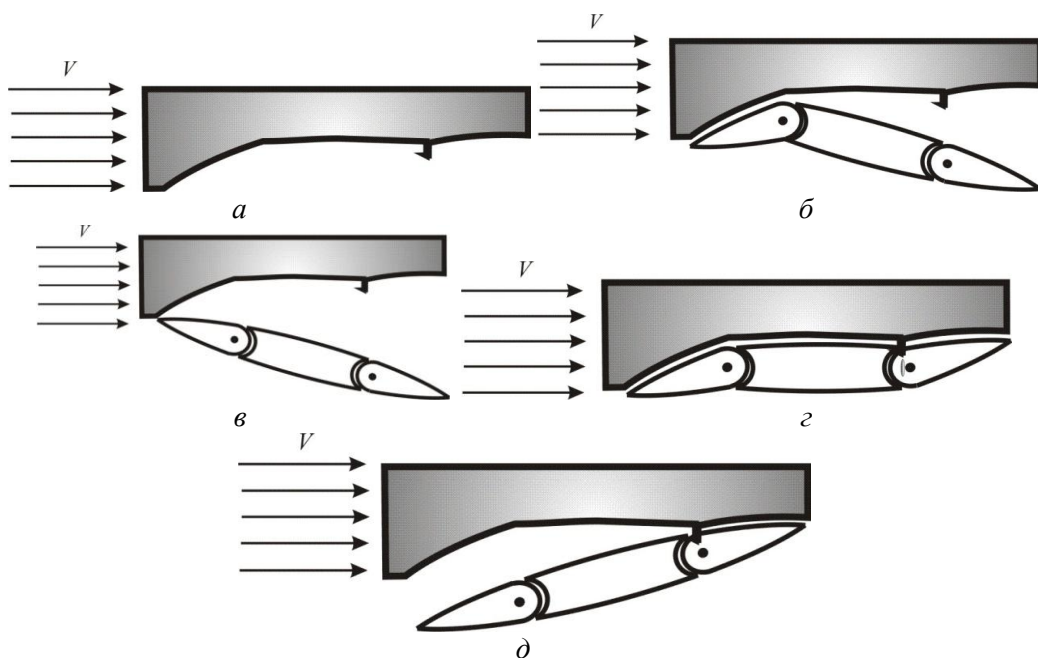


Рис. 8 – Проект верхнього стопора і процес зміни напрямку крила

Цього можна досягти чисто механічним способом, використовуючи енергію руху крила (напору вітру). Для цього необхідно встановити фігурний стопор на кінцях для зміни напрямку рухів крила. Проект такого стопора показаний на рис. 7 і рис.8.

**Розробка принципу роботи пристрою зміни напрямку руху центральної частини крила.** Пропонується така конструкція. У положенні (а) на рис. 9 крило опускається за напрямними. Зусилля крила фіксується стопорами.

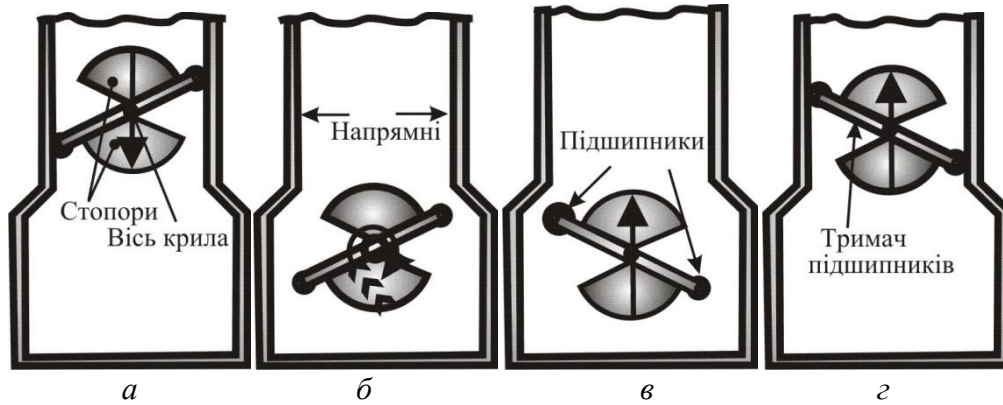


Рис. 9 – Процес зміни напрямку крила

Ковзання за напрямними проводиться за допомогою підшипників і має мінімальне значення. Це відбувається до моменту виходу осі крила у розширену область напрямних. Тут можливе обертання тримача з підшипниками (рис. 9 б). За рахунок стопора, розглянутого на рис. 7, 8, відбувається зміна зусиль на протилежні (рис. 9 в) і підйом крила. Після цього знову відбувається рух крила за напрямною, але тільки вгору (рис. 9 д) до верхньої межі, улаштованої строго симетрично нижній. І процес повторюється без додаткового регулювання зовні. Тобто рух відбувається у автоколивальному режимі. Період коливань регулюється забором енергії від руху крила. Загальний вигляд вітрогенератора коливального типу представлено на рис. 10.

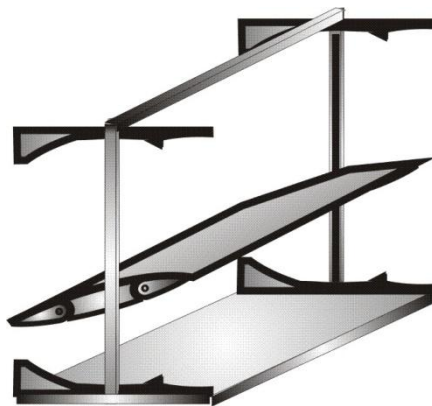


Рис.10 – Загальний вигляд вітрогенератора

**Розрахунок вітрогенератора.** Для спрощення розрахунку розділимо витрати енергії на створення піднімальної сили  $W_Y$  і витрати енергії, що йдуть на подолання опору вітру  $W_X$ , який набігає зі швидкістю  $V_0$ :

$$W_Y = Y \cdot V_{\Pi}; \quad W_X = X \cdot V_0,$$

де  $Y$  – піднімальна сила  $X$  – сила опору руху,  $V_{\Pi}$  – швидкість підйому крила ( $V_{\Pi} < V_0$ ).

Відповідно до визначення поляр (формула (1)), силу лобового опору  $X$  і роботу сил затримки  $W_{\text{зат}}$  визначимо як:

$$X = C_X \rho \cdot S \cdot V_0^2, \quad W_{\text{зат}} = 1/2 \cdot C_X \rho \cdot S \cdot V_0^3.$$

У межах ламінарності повітряного потоку інших витратних механізмів немає.

Піднімальна сила  $Y$  може виконувати корисну роботу  $W_{\text{кор}}$ :

$$Y = C_Y \rho \cdot S \cdot V_0^2 \text{ і } W_{\text{кор}} = 1/2 \cdot C_Y \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 \cdot V_{\text{П}}. \quad (2)$$

Якщо ввести поняття якості крила, що існує в аеродинаміці літального апарата:  $K = C_X / C_Y$ , то співвідношення корисної роботи до витрат матиме вид:

$$W_{\text{кор}} / W_{\text{зат}} = K \cdot V_{\text{П}} / V_0.$$

Звідси витікає, що необхідно вибрати коефіцієнт якості як можна найбільшим (методика такого вибору описана напочатку роботи), а також, що відбір енергії необхідно проводити при максимально можливій швидкості з урахуванням обмеження ( $V_{\text{П}} < V_0$ ).

**Розрахунок ККД вітрогенератора.** З урахуванням значення піднімальної енергії (2) та енергії повітря, що набігає, ККД перетворення вітрової енергії  $\eta$  обчислюється за формулою:

$$\eta = \frac{C_Y \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 V_{\text{П}}}{\rho \cdot S \cdot V_0^3} = C_Y \frac{V_{\text{П}}}{V_0}$$

Це означає, що для одержання високого ККД необхідно: обирати кут атаки якнайбільшим до критичного; швидкість підйому крила також повинна бути якнайбільшою, тобто на початковому етапі підйому (опускання) треба дати розігнатися крилу до обраної швидкості. Крім цього, при установці на платформу, що рухається зі швидкістю  $V_{\text{пл}}$ , і при зустрічному вітрі  $V_0$  маємо:  $V_0 = V_{\text{пл}} + V_0$ .

Витрати на лобовий опір повітрю з боку генератора та його вироблена енергія складатимуть:

$$W_{\text{зат}} = C_X \cdot \rho \cdot S (V_{\text{пл}} + V)^3; \quad W_{\text{кор}} = C_Y \cdot \rho \cdot S \cdot V (V_{\text{пл}} + V)^2 V_{\text{П}}.$$

Різниця між витратами складе:

$$\Delta W = \rho \cdot S \cdot (V_{\text{пл}} + V)^2 \cdot (C_Y V_{\text{П}} - C_X (V_{\text{пл}} + V)) = \rho \cdot S \cdot (V_{\text{пл}} + V)^2 \cdot C_X (KV_{\text{П}} - V_{\text{пл}} - V).$$

Коефіцієнт якості для крила становить порядку 10. Швидкість платформи щодо швидкості вітру невелика. Звідси значення приросту енергії при швидкості руху крила більше 1/10 від швидкості вітру буде позитивним. Тому із всіх відомих вітрогенераторів тільки генератор, який запропоновано у цій роботі, можна встановлювати на судно. Тому таку модель вітрогенератора можна вважати судновою.

**Висновки.** Таким чином, розроблено крило гнучкої конструкції, що дозволяє працювати генератору в автоколивальному режимі. Також розроблені конструкції стопорів, напрямних і відповідні умови для оптимальної роботи генератора. У результаті знайдено генератор коливального типу, котрий можна встановлювати на судні. Він не створює низькочастотних перешкод, є безпечним для птахів і може також встановлюватися на дахах будинків і споруд.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Городов Р. В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии [Текст] / Р. В. Городов, В. Е. Губин, В. Е. Матвеев. – Томск : Из-во Томского политехнического университета, 2009 – 294 с.
2. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Том 1. Ветроэлектрогенераторы [Текст] / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев – Харьков : Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2003, – 400 с.
3. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов [Текст] / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

4. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Том 2. Ветроэлектрогенераторы [Текст] / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев – Харьков : Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2004. – 519 с.

5. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки [Текст] / В. П. Харитонов. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

6. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов [Текст] / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

7. Ушаков Б. А. Атлас аэродинамических характеристик профилей крыльев [Текст] / Б. А. Ушаков, В. П. Красильщиков, А. К. Волков, А. Н. Гржекоржевский. – М. : Из-во БНТ НКАП, 1949. – 398 с.

8. Глаургет Г. Основы теории крыльев и винта [Текст] / Г. Глаургет – Л. : ГНТИ, 1931 – 179 с.

9. Янсон Р. А. Теория идеального горизонтально-осевого ветродвигателя в свободном атмосферном потоке : учебное пособие по курсу «Ветроэнергетика» [Текст] / Р. А. Янсон. – М. : Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005 – 36 с.

**Штанько А.Д., Литвинова М.Б. СУДОВОЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОР КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА**

*Разработан ветрогенератор колебательного типа, который можно устанавливать на судне. Предложено крыло гибкой конструкции, которое позволяет работать генератору в автоколебательном режиме, а также конструкция стопоров и направляющих, соответствующих оптимальной работе генератора.*

**Ключевые слова:** ветрогенератор, автоколебательный режим, крыло, угол атаки.

**Shtanko O.D., Litvinova M.B. VESSEL WIND ALTERNATOR OF THE OSCILLATING TYPE**

*We discuss the design of the wind alternator of the oscillating type, which can be installed on the vessel. The alternative wind turbines were analyzed. We came to a conclusion that there is a need to use the unique properties of the wing according to its intended purpose - getting the lift force of the wing. Methods of obtaining energy and the corresponding design of the alternator were developed. It is shown that even if the base of the alternator moves against the wind, there is a method of obtaining energy from the alternator in higher quantity than the expenses for the drag. What is more, using a flexible maintenance of consumption, the quantity of additional energy will exceed the amount of energy obtained without movements of the base.*

*A flexible wing design that allows you to operate the generator in oscillating mode as well as design guides and stops corresponding optimal operation of the generator. As a result, alternator of the of the oscillating type that can be installed on the vessel was created. It does not create low frequency noise, is safe for birds and can also be installed on the roofs of houses and buildings.*

**Keywords:** wind alternator, self-oscillating mode, wing, angle of attack.

© Штанько О.Д., Литвинова М.Б.

Статтю прийнято  
до редакції 30.11.14

***ПРОБЛЕМИ ВИЩОЇ ШКОЛИ***

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕНОМЕНА ИНИЦИАЦИИ В СИСТЕМЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

*Евдокимова В.А.*

*Херсонская государственная морская академия,*

*Коркина Е.П.*

*Психологический центр, г. Москва, Россия,*

*Хаев Л.Г.*

*Служба помощи, г. Берлин, Германия*

*Общий кризис системы профессионального образования как западной, так и отечественной, побуждает к её более глубокому анализу в более широком культурном контексте. С точки зрения адаптационного подхода, профессиональное образование может быть рассмотрено как процесс адаптации индивида и сообщества к выполнению профессиональной деятельности. На основе рассмотрения сущности и динамики процесса адаптации обоснована целесообразность целенаправленного использования феномена инициации в системе профессионального образования. Образование имеет своей целью и неразрывно сопряжено с изменениями социального и психологического статуса индивида, манифестный аспект которых проявляется в форме инициаций. Может быть построена классификация событий-ритуалов и событий-инициаций в образовании по основаниям степени общности ритуала, формы и момента события инициации. Каждая подобная инициация может быть охарактеризована ее центральным событием, начальным и конечным состояниями индивида, тремя этапами его инициации – сегрегация, транзикация и инкорпорация. Идеология и формы практического применения обрядов и ритуалов инициации в вузах и других учебных заведениях профессионального образования определяют, соответственно, направление и величину эффектов использования феномена инициации в образовательном процессе. Среди таких эффектов особенно выделяется возможность коррекции ценностных ориентаций обучаемых.*

*Ключевые слова:* профессиональное образование, адаптация, феномены культуры, инициация, обряды и ритуалы.

**Введение.** Профессиональные успехи, профессиональная компетентность человека на протяжении всей истории человечества была мерилем его личностных и социальных достоинств. В последнее время в области профессионального обучения и образования на всех его этапах – от училища до докторантуры – наблюдаются непрекращающиеся попытки его реформирования как на основе новых модных идей вроде компетентностного подхода или болонской системы, так и на основе реанимации известных (метод проектов, прием в вузы по ЗНО). Это свидетельствует о кризисе системы образования, очевидном для большинства профессионалов [1]. Большинство преподавательского состава вузов страны констатирует резкое снижение качества образования и разрушение образовательной системы [2].

Не останавливаясь на тяжёлом системном кризисе как очевидной причине деградиционных изменений во всех сферах общества, обратимся к общим представлениям о профессиональном обучении. Его, как правило, рассматривают как процесс физиологической, психологической и социальной адаптации обучаемых к профессиональному труду и, шире, профессиональной деятельности. Адаптационный подход применяют к рассмотрению как конкретных трудовых процессов [3], так и всей трудовой и профессиональной деятельности [4, 5]. Критерии профессиональной адаптации представляют собой две группы показателей:

- «объективные» – оценка адаптированности, приспособленности с внешней стороны (ближайшее окружение, институциональное окружение, общество в целом);
- «субъективные» – оценка «с внутренней стороны», стороны самого объекта или субъекта адаптации [4, с. 110].

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими заданиями.** Моделями адаптации являются полигармонические и полиэкспоненциальные (то есть, плавные и непрерывные) зависимости [5].

«Адаптація – процес приспособлення строення і функцій організмів (особей, популяцій, видів) і їх органів к умовам середовища. Процес приспособлення живих істот к середовищу являється універсальним свойством всього живого, основним умовою життя» [6, с. 5].

Согласно философскому обобщению, «раздражение протоплазмы и реакция протоплазмы имеются налицо повсюду, где есть живая протоплазма. А так как протоплазма, благодаря действию медленно изменяющихся раздражений, сама в свою очередь изменяется, – иначе она бы погибла, – то ко всем органическим телам необходимо применить одно и то же выражение: приспособление» [8, том 20, с. 633].

По У. Р. Эшби, «форма поведения адаптивна, если она удерживает существенные переменные в физиологических пределах» [16, с. 98].

**Анализ последних исследований и публикаций и выделение нерешенных задач проблемы.** Одним из выходов в сложившейся ситуации является материально-техническое оснащение лабораторий, учебных судов и установка хороших тренажеров в морских вузах.

**Формулировка целей статьи.** Не оспаривая адаптационного подхода к обучению в целом и профессиональному обучению, в частности, необходимо отметить, что во всех цитированных выше и иных работах по умолчанию подразумевается, что:

- изменения внешней среды являются плавными, медленными и постепенными;
- соответствующая им адаптация (а, в нашей ситуации, профессиональное обучение) также идёт плавно, медленно и постепенно, «малыми шагами», «медленно, но уверенно», «шаг за шагом» (известный принцип постепенности в дидактике).

Однако:

- с одной стороны, изменения внешней среды не всегда являются постепенными: не отвечают этому условию, например, переход на применение новых технологий или использование нового оборудования, выпуск новых видов продукции или предоставление новых видов услуг, переезд на новое место или переход на военное положение;

- с другой стороны, как естественная, спонтанная, так и оптимальная, рациональная реакция системы на плавное изменение внешней среды не всегда является плавной: известен принцип создателя системы самбо – «отвечать броском на удар, ударом на бросок» (то есть, в нашей интерпретации, в ином модусе, в другой модальности). Модная в последнее время математическая теория особенностей или, иначе, теория катастроф рассматривает «катастрофу» как «скачкообразное изменение, возникающее в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий» [1, с. 8].

Отсюда, оптимальная схема обучения – общего, профессионального, социального – включает:

- относительно длительные периоды плавного и постепенного накопления знаний, умений, навыков, компетенций;

- относительно краткие периоды резких качественных изменений, скачков, переходов в иное состояние (в традиционных обществах такие переходы называли инициациями).

Аналогичный результат может быть также получен из общего рассмотрения диалектики непрерывного и дискретного в применении к процессам обучения, социализации, адаптации. Инициации могут быть представлены как манифестный по содержанию и дискретный по форме аспект обучения, социализации, адаптации, в отличие от дидактического по содержанию и непрерывного по форме аспекта – увеличения объёма знаний, обучения умениям и навыкам, накопления опыта, развития компетентности.

Б. Ф. Ломов указывает, что из трёх сторон трудовой деятельности – когнитивной, регулятивной и коммуникативной, две последние психологически наименее изучены [7]. Они же имеют не только личностный, но и социальный характер, что определяет значительное влияние на них процессов инициации индивида.

**Изложение материалов исследования.** Под инициацией (от лат. *initio* – посвящение, совершение таинства) понимают ритуальный переход индивида из одного социального статуса в другой, сопровождающийся соответствующими обрядами. Инициации как элемент духовной и социальной жизни зародились в глубокой древности, имеют универсальное географическое распространение, встречаются во все исторические эпохи на любых стадиях социального развития [2].

В традиционных культурах инициации имеют трёхэтапную структуру:

- сегрегация (разрыв неофита с его окружением) и изоляция (уход, увод, смена образа жизни);
- транзикация (промежуточное, лиминальное, бесстатусное состояние посвящаемого);
- инкорпорация (возвращение к общественной жизни в новом статусе) [2].

Метафорой инициации является символическая смерть посвящаемого и его последующее возрождение в новом качестве («умри и стань» И. В. Гёте). «Умереть и вновь родиться – непросто», – любил повторять Фриц Перлз. «Пиковые переживания «обладают такой остротой» и «заходят так далеко, что возникает мысль о своего рода смерти. И мои «подопытные», и многие авторы, писавшие о пиковых переживаниях, сравнивали их с переживанием умирания» [9, с. 121].

Фундаментальная культурная роль инициаций исторически видна из того, что как только «цивилизаторы» начинали запрещать и преследовать инициационные обряды и ритуалы, культура коренного населения умирала без войн, рабства и геноцида. Так, например, произошло, когда на Новой Гвинее австралийская администрация сменила немецкую, что «привело к своего рода культурному параличу» [10, с. 56]. Аналогичны события на Самоа, приведшие к «полной дезорганизации хозяйства островитян» [10, с. 103], «реформы» 90-х в нашей стране.

Сложность, глубина и многоаспектность феномена инициации требует рассматривать его в широком междисциплинарном контексте. Сведения об инициациях могут быть получены из следующих источников:

- данные археологии;
- данные антропологии и этнографии о жизни «неразвитых» народов и культур, где существуют или существовали развитые обряды инициации (М. Мид);
- данные социологии о жизни «развитых» народов и культур, где инициационные обряды существуют в редуцированной и извращённой форме;
- данные изучения древних и современных текстов, например, священных книг, народных сказок (В. Я. Пропп);
- данные гуманистической, экзистенциальной и трансперсональной психологии, где инициациям могут быть сопоставлены «пиковые переживания» А. Маслоу, конфронтации с «конечными данностями» И. Ялома, «трансперсональный опыт» С. Грофа.

В современном капиталистическом обществе инициации, будучи насильственно изгнанными из институализированной социальной жизни, заняли две ниши:

- ритуалы закрытых мужских сообществ (флот, армия, криминальный мир, тюрьма), олицетворяющие борьбу за власть – групповые избиения, гомосексуальное насилие, система физических и психологических унижений и т. п.;
- спонтанные жизненные события, лично значимые и несущие сильную эмоциональную нагрузку.

Обычно инициации включают тяжёлые, подчас мучительные физические (боль) и психологические (страх) испытания, по окончании инициации проводятся очистительные обряды (омовение), посвящённый получает определённые знаки отличия (татуировки), подчёркивающие социальную грань между иницированными и неиницированными [15].

Частыми элементами и ритуалами инициационных обрядов являются: использование специфического освещения (свечи, факелы), музыки, запахов, еды и питья (или их лишения), наркотических средств; групповые пение, танцы, барабанный бой, молитва; ободрение и благословение иницианта руководителем до и после основного этапа; ритуальные песня и танец, выполнение физического и интеллектуального задания, преодоление препятствия, битва-поединок, «испытание» иницианта; очищение и омовение, разрисовка и татуирование, переодевание и украшение иницианта.

Субъективное представление многих моментов обучения, особенно, профессионального, как глазами учащего, так и глазами обучаемого часто отвечает именно картине «испытания». Особенно такая картина актуализируется при вхождении в группу новичка: именно так воспринимает это и он сам, и остальные, уже «искушённые» учащиеся, и обучающие.

Для обучаемого в процессе «испытания» важно и «доказать самому себе», и продемонстрировать учителю, преподавателю, профессору (фрейдовскому «отцу») собственную личностную значимость, состоятельность, заслужить его высокую оценку, хотя бы и косвенную. Эта оценка весьма субъективна: из практики обучения на самых разных этапах – от младших классов до докторантуры – известно, что для одного четвёрка – это недопустимо низкая оценка, в то время, как для его соседа тройка – прекрасный результат.

Возможны различные основания классификации инициаций. Так, А. С. Кирилук предлагает в качестве таких оснований:

- 4 «категории предельных оснований», считая их конечными данностями – рождения, жизни, смерти, бессмертия;
- 4 культурных кода – элиментарный, эротический, агрессивный, информационный [3, с. 29];
- 5 уровней – онтологический (биологический); предметно-практический; обрядово-ритуальный; духовно-практический; духовно-теоретический (понятийный) [3, с. 25].

Необходимо также учитывать, что центральное событие инициации может быть разыграно, изображено, описано как прямо (болезнь и выздоровление, смерть и воскресение героя), так и косвенно, опосредовано, метафорически (например, зачатие и рождение героя как его проглатывание и выплёвывание зверем или рыбой) [3, с.46, 103].

В данной работе для целей использования инициации в процессе обучения и, шире, в системе профессионального образования события, разыгрываемые в качестве инициационных, классифицировали по следующим основаниям (табл. 1):

Таблица 1 – Пути использования инициационных событий в образовании

<i>Характеристики перехода</i>			<i>Содержание этапов инициации</i>		
Событие перехода	Исходное состояние иницианта	Конечное состояние иницианта	Начальный – сегрегация	Промежуточный – транзиция	Завершающий – инкорпорация
<i>Ритуалы этикета</i>					
Приветствие группой преподавателя, декана, ректора	-	-	Вход группы или преподавателя	Вербально-моторный ритуал приветствия	Группа в состоянии готовности
Ритуалы свободного (внеучебного) времени	-	-	Сбор группы	Ритуал группы, шутка группы	Уход группы
Праздник группы, день группы	-	-	Сбор группы	Гимн или тост группы	Уход группы

Продолжение табл. 1

Ритуалы-праздники					
Праздник факультета или специальности	-	-	Сбор студентов факультета или специальности	День рождения факультета, специальности <sup>4</sup>	Уход студентов факультета или специальности
Праздник учебного заведения	-	-	Сбор студентов вуза	День рождения учебного заведения	Уход студентов вуза
Праздник всех вузов	-	-	Сбор студентов вуза	Татьянин день	Уход студентов вуза
Инициация в форме испытания					
Зачёт, экзамен	Индивид ещё не сдававший	Индивид сдавший или не сдавший	Подготовка психологическая и по существу	Сдача зачёта или экзамена	Поздравления, чествование, празднование
Спортивное состязание				Участие в соревнованиях	
Олимпиада				Участие в олимпиаде	
Инициация в форме награждения					
Входная, вступительная инициация	Абитуриент	Студент	Сдача вступительных экзаменов или ЗНО	Имматрикуляция, посвящение в студенты	Поздравления, чествование, празднование
Промежуточная инициация	До экватора	После экватора		Сдача первой сессии или «экватор»	
Выходная, завершающая инициация	Студент	Специалист, магистр		Посвящение в профессию	

В системе профессионального образования нежелательно имитировать православные церковные таинства: крещение и миропомазание, исповедь и причастие, венчание, пострижение, возведение в сан, а также обряды и ритуалы других мировых религий (обрезание, конфирмация).

Инициационный подход в профессиональном образовании вызывает не один изолированный эффект, а целую систему, комплекс эффектов, затрагивающих достаточно широкую систему личностных установок. Достаточно указать, что кроме когнитивных, личностных и социальных аспектов обучения и отдельный ритуал и, тем более, инициационный обряд затрагивает духовный аспект личности.

Важность этого фактора в свете событий последнего времени трудно переоценить. О глубине морального, нравственного падения не отдельных отщепенцев, но интеллигенции, общества в целом говорят и пишут политики, учёные, священники, деятели литературы и искусства. Этот факт во многом объясняется разрушением цельной действовавшей системы социальных обрядов и ритуалов.

В своей инаугурационной речи Ф. Д. Рузвельт в своё время сказал: «Спасаясь бегством, менялы покинули храм нашей цивилизации. Теперь мы можем вернуть этот храм к древним истинам. Мерой этого возвращения служит степень нашего обращения к общественным ценностям, более благородным, нежели простая денежная прибыль... Большие цели пробудили в нас священное чувство долга... Мы смотрим в грядущие трудные дни, согретые теплом национального единства, с осознанным стремлением вернуться к старым, дорогим нам моральным ценностям» [11].

Возрождение системы инициаций и ритуалов в образовании позволит выправить ценностную иерархию, скорректировать относительную весомость ценностей, поставить на первое место не объём бицепса и не коэффициент интеллекта и, тем более, не толщину кошелька, а высокие ценности человеческого существования.

Принципіально важною являється вищеописана можливість створення системи обрядів і ритуалів ініціації в професійному освітанні, питаючись от глибоких культурних і духовних коренів отечественної традиції навчання і підготовки спеціалістів мирового класу.

**Висновки.** 1. Використання ініціації в професійному освітанні являється одним із шляхів повернення йому не тільки когнітивного і соціального, але і глибокого духовного значення.

2. Одним із важливих ефектів використання ініціацій в професійному навчанні являється можливість корекції деформованих ціннісних орієнтацій навчаних.

3. Ініціаційний підхід може бути успішно використаний в системі професійного освітанні на основі класифікації відповідних подій по основах типу події (подія-ініціація або окремий ритуал); ступеню общности події (для індивіда, групи, спеціальності, факультета, вуза, всіх вузів) і відношення дати події до часу навчання (вхідна, проміжова і вихідна ініціація).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Арнольд В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. – М. : Наука, 1990. – 128 с.
2. Геннеп А., ван. Обряды перехода. Систематическое изучение обрядов. – М. : Издательская фирма «Восточная литература» РАН, 1999. – 198 с.
3. Кирилук А. С. Универсалии культуры и семиотика дискурса. Миф / А. С. Кирилук. – Одесса : Рось, 1996. – 143 с.
4. Кіпень В. П., Коржов В. О. Викладачі вузів : соціологічний портрет. – Донецьк : ДНУ, 2001. – 198 с.
5. Корпоративная культура : аспекты управления / Г. Л. Хаєт, А. Л. Еськов и др. – Донецк : Донбасс, 2003. – 400 с.
6. Косилов С. А. О физиологических основах производственного обучения / С. А. Косилов. – М. : Высшая школа, 1981. – 79 с.
7. Ломов Б. Ф. Вопросы общей, педагогической и инженерной психологии / Б. Ф. Ломов. – М. : Педагогика, 1991. – 296 с.
8. Маркс К., Энгельс Ф. Том 20 // Соч. 2-е изд. – М. : Госполитиздат, 1981.
9. Маслоу А. Психология бытия. – М. : Рефл-бук; Киев : Ваклер, 1997. – 304 с.
10. Мид М. Культура и мир детства. Избранные произведения / М. Мид. – М. : Наука, 1988. – 429 с.
11. Рузвельт Ф. Д. Инаугурационная речь 04.03.1933. – Режим доступа : <http://nstarikov.ru/blog/45334>.
12. Солодухова О. Г. Становлення особистості вчителя у процесі професійної адаптації / О. Г. Солодухова. – Донецьк : Лебідь, 1996. – 176 с.
13. Солодухова О. Г., Вовк Н. В. Дослідження професійної адаптації вчителя праці як багатомірного стохастичного процесу // Проблеми трудової і професійної підготовки. Вип. 1. – Київ–Слов'янськ : ІЗМН–СДПІ, 1997. – С.130-132.
14. Хаєт Л. Г. Нові аспекти в діяльності вчителя праці / Л. Г. Хаєт, В. В. Стешенко, Н. В. Вовк // Проблеми трудової і професійної підготовки : науково-методичний збірник, вип. 12. – Слов'янськ : СДПУ, 2008. – С. 16-23.
15. Элиаде М. Тайные общества: Обряды инициации и посвящения. – М. : Гелиос ; Киев : София, 2002. – 352 с.
16. Эшби У. Р. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1962. – 399 с.

**Євдокимова В.А., Коркіна Є.П., Хаєт Л.Г. ВИКОРИСТАННЯ ФЕНОМЕНУ ІНІЦІАЦІЇ В СИСТЕМІ ОСВІТИ**

*Загальна криза системи професійної освіти, як західної, так і вітчизняної, спонукає до її більш глибокого аналізу у більш широкому культурному контексті. З погляду адаптаційного підходу, професійну освіту можна розглядати як процес адаптації особистості і спільноти до виконання професійної діяльності. На підставі розгляду сутності і динаміки процесу адаптації доведена доцільність цілеспрямованого використання феномену ініціації в системі професійної освіти. Освіта має за своє призначення і нерозривно пов'язана зі змінами соціального та психологічного статусу особистості, маніфестний аспект яких проявляється у формі ініціації. Може бути побудовано класифікацію подій-ритуалів і подій-ініціацій в освіті за ознаками ступеню загальності ритуалу, форми і моменту ініціаційної події. Кожну таку ініціацію можна охарактеризувати її центральною подією, початковим і кінцевим станом індивіда, трьома стадіями його ініціації – сегрегація, транзиція та інкорпорація. Ідеологія і форми практичного застосування обрядів і ритуалів ініціації у вищих та середніх навчальних закладах професійної освіти визначають, відповідно, напрямок і величину наслідків використання феномену ініціації в освітньому процесі. Особливо вирізняється серед таких наслідків можливість корекції ціннісних орієнтацій студентів й учнів.*

**Ключові слова:** професійна освіта, адаптація, феномени культури, ініціація, обряди та ритуали.

**Ievdokimova V.A., Korkina E.P., Khayet L.G. USING OF A PHENOMENON OF INITIATION IN THE SYSTEM OF PROFESSIONAL EDUCATION**

*The general crisis of professional education system, both western and domestic, induces to its deeper analysis involving the wider cultural context. From the point of view of adaptation approach, professional education can be considered as a process of adaptation of the individual and community to performance of professional activity. Having considered the essence and dynamics of adaptation process, a phenomenon of initiation in professional education system is proved. Education has the purpose and indissolubly interfaced with changes of social and psychological status of the individual, and reveal the aspect of manifest presented by initiations. Classification of events-rituals and events-initiations in education on the bases of degree of a generality of ritual, a form and the moment of event-initiation can be constructed. Each similar initiation can be characterized by the central event, initial and final states of a person, three stages of initiation – segregation, transition and incorporation. The ideology and forms of practical application of ceremonies and rituals of initiation in higher education institutions and other institutions of professional education define, respectively, the direction and the importance of consequences to use a phenomenon of initiation in educational process. The possibility for correction of trainee's value orientations is especially distinguished among such consequences.*

**Keywords:** professional education, adaptation, culture phenomena, initiation, ceremony and rituals.

© Євдокимова В.А., Коркіна Є.П., Хаєт Л.Г.

Статтю прийнято  
до редакції 27.10.14

УДК 378: 37.022

## АЛГОРИТМ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМПЕТЕНТІСНОГО ПІДХОДУ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

*Проценко В.О., Настасенко В.О.*

*Херсонська державна морська академія*

*У статті розглянуто особливості впровадження компетентісного підходу при підготовці фахівців з експлуатації суднових енергетичних установок. Проаналізовані сучасні вимоги Міжнародних організацій до рівня компетентності цих фахівців. Встановлені та проаналізовані проблеми підготовки вказаних фахівців у вітчизняних навчальних закладах. На основі виконаних досліджень намічені шляхи розв'язання виявлених проблем та сформульовані основні вимоги до алгоритму реалізації компетентісного підходу, що забезпечить досягнення рівня компетентності не нижче заявленого Кодексом ПДНВ. Розроблено блок-схему алгоритму, що відповідає встановленим вимогам та ілюструє новий алгоритм.*

**Ключові слова:** компетентісний підхід, спеціаліст, експлуатація суднових енергетичних установок.

**Вступ.** Для інженера-судномеханіка необхідність самостійного прийняття обґрунтованих рішень і демонстрації своєї компетентності під час роботи набуває особливого значення, оскільки від цього рішення залежить не тільки кар'єрний ріст, а й життя людей на борту судна та березі.

Обов'язкові мінімальні вимоги до дипломування вахтових механіків суден встановлені Кодексом ПДНВ та Манільськими поправками до нього. Серед інших встановлена вимога щодо відповідності механіка після проходження ним навчання та підготовки стандартам компетентності, визначеним у відповідних розділах Кодексу ПДНВ (далі Кодекс). Для вахтового механіка, зокрема, цей стандарт вписано у розділі А-III/1 Кодексу. У ньому зазначено, що кожний кандидат на отримання професійного диплома вахтового механіка морського судна з машинним відділенням, що обслуговується традиційно, або періодично не обслуговується, та головною установкою потужністю 750 кВт або більше, повинен продемонструвати здатність на рівні експлуатації прийняти на себе завдання, обов'язки та відповідальність, що перелічені в колонці 1 таблиці А-III/1. Ключова у цій вимозі «здатність прийняти на себе на рівні експлуатації завдання, обов'язки та відповідальність». Прийняттю відповідальності передують обов'язкове прийняття самостійних рішень щодо того чи іншого аспекту управління, технічного обслуговування або ремонту будь-якого обладнання. Крім того, у випадку інженера-судномеханіка, необхідність самостійного прийняття обґрунтованих рішень і демонстрації своєї компетентності набуває особливої гостроти через наявність прямої залежності між правильністю цих рішень та безпекою. Прийняття самостійних рішень, уміння їх обґрунтувати та захистити, на думку авторів, є найскладнішим в інженерній практиці і саме до цього повинна підготувати майбутнього судномеханіка освітня установа. Проте підходи до підготовки майбутніх суднових механіків на сьогодні досліджені недостатньо.

**Аналіз виконаних досліджень та постановка задачі.** Одним із очевидних підходів до підготовки суднового механіка – компетентісний підхід, що базується на необхідності забезпечення досягнення майбутнім судновим механіком мінімальних компетентностей, встановлених кодексом ПДНВ. Зокрема, у розділі А-III/1 кодексу ПДНВ встановлено компетентність «Технічне обслуговування та ремонт суднових механізмів та обладнання», що забезпечується наступними компетенціями [1]:

1. Заходи безпеки, що необхідно приймати для ремонту та технічного обслуговування, зокрема безпечну ізоляцію суднових механізмів та обладнання, що вимагається до того, як персоналу дозволено працювати з такими механізмами або обладнанням.

2. Належні початкові знання та навички роботи з механізмами.

3. Технічне обслуговування та ремонт такі, як розбирання, налаштування та збирання механізмів і обладнання.
4. Використання належних спеціалізованих інструментів та вимірювальних пристроїв.
5. Проектні характеристики та вибір матеріалів, що використовуються під час виготовлення обладнання.
6. Читання креслень і довідників, що відносяться до механізмів.
7. Читання схем трубопроводів, гідравлічних і пневматичних систем.

Оволодіння наведеними компетенціями повинно дозволити механіку обґрунтовано приймати рішення і усвідомлено демонструвати відповідну базову компетентність. А забезпечити оволодіння цими компетенціями повинен навчальний заклад, реалізуючи свою освітню функцію відповідно до вимог ПДНВ.

Фактично на практиці прийняття рішень відбувається на основі таких варіантів дій:

- а) інтуїції;
- б) чітких інструкцій та вказівок;
- в) власного багаторічного досвіду;
- г) знання процесів, що відбуваються в обладнанні, його конструкції, та володіння практичними навичками роботи з ним.

Варіант а) для інженера-судномеханіка є неприйнятним та небезпечним (однак на жаль часто має місце); варіант б) неможливим, через відсутність подібних вказівок цих ситуацій які можуть виникнути; варіант в) набувається із багаторічним досвідом роботи. Для випускника навчального закладу, на плечі якого лягає колосальна відповідальність повинен бути гарантовано забезпечений саме останній варіант.

Забезпечення такого варіанту підготовки механіка, відповідно до діючих стандартів компетентності викликає ряд труднощів, що повинен подолати навчальний заклад, виконуючи свою функцію підготовки спеціалістів. Історія [2, 3], теорія та практика [4–9] запровадження компетентнісного підходу при підготовці спеціалістів різноманітних галузей розглянуто в працях багатьох дослідників. Розрізненість вимог до компетентності Кодексу [1] та змісту стандарту освіти [10] (далі Стандарт), особливості навчального процесу в сучасних ВНЗ України взагалі, теоретичної та практичної підготовки майбутніх фахівців з експлуатації суднових енергетичних установок зокрема, а також особливості роботи інженерів судномеханіків, що здобули освіту в Україні, в закордонних компаніях, – формують умови для виконання нових досліджень в галузі теоретичних та практичних особливостей впровадження компетентнісного підходу при підготовці майбутніх суднових механіків. Аналіз факторів, що обмежують впровадження компетентнісного підходу та розробка комплексного алгоритму його реалізації, що дозволяє розв'язати теоретичні, практичні та організаційні проблеми підготовки фахівців з експлуатації суднових енергетичних установок становить мету даної роботи.

**Виклад основного матеріалу.** Очевидний початок впровадження компетентнісного підходу в підготовку майбутніх судномеханіків – розв'язання першої проблеми – уточнення змісту дисциплін, що передбачені Стандартом [10] з метою його узгодження із вимогами Кодексу [1]. Кодексом виписано чіткий набір мінімальних компетентностей, що необхідно опанувати майбутньому судномеханіку, і які повинні бути забезпечені в результаті вивчення дисциплін, передбачених Стандартом. При цьому, якщо рівень компетентності випускника навчального закладу представити у вигляді кола (рис. 1), то дисципліни Стандарту, зображені на рис. 1 криволінійними фігурами, повинні в ідеалі, як мінімум, мати площу не меншу площі кола рівня компетентності та мати спільні границі, тобто стикуватися між собою. Фактично зміст суміжних дисциплін нерідко має дубльовані теми та невисвітлені взагалі, що у підсумку призводить до появи «перекриттів» та «нестиківок» (рис. 1) при забезпеченні заданого Кодексом рівня компетентності та є значною проблемою під час впровадження компетентнісного підходу при підготовці судномеханіків. Якщо наявність «перекриття» змісту дисциплін

навчального плану суттєвого негативного впливу на якість підготовки судномеханіків не має, та є навіть корисною для кращого засвоєння матеріалу і формування умов для подальшого розширення технічного кругозору і виконання наукових досліджень, то наявність «нестиковок» – шкідливий фактор і потребує якнайшвидшого коригування змісту дисциплін.

Таким чином, уточнення змісту дисциплін необхідно виконати на першому етапі впровадження компетентнісного підходу, з метою ліквідації «нестиковок» у їх змісті та вимогах Кодексу. При цьому, у зв'язку зі збільшенням кількості дисциплін та зменшенням обсягу кожної із них, збагачення студента потрібною інформацією повинно відбуватись у всіх можливих випадках.

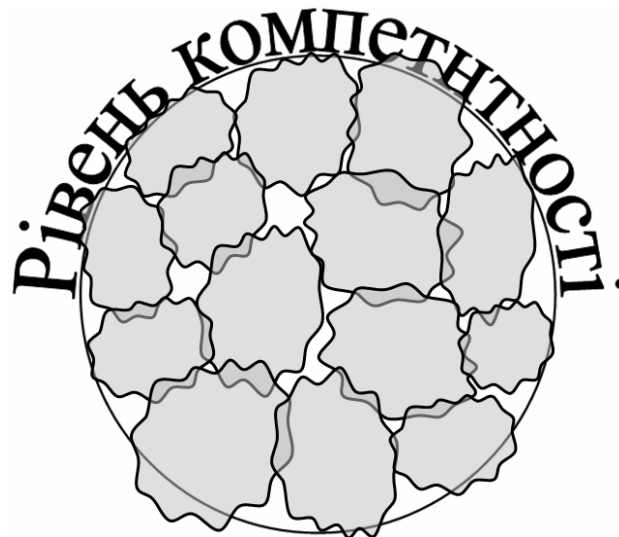


Рис. 1 – Вплив змісту дисциплін на забезпечення рівня компетентності майбутнього судномеханіка до уточнення їх змісту

За умов скорочення обсягу ключових навчальних дисциплін, цього можна досягнути за рахунок поглиблення міжпредметних зв'язків і взаємної інтеграції дисциплін природничо-наукового, загальноінженерного та спеціального блоків. Наприклад, забезпечення початкового ознайомлення зі змістом спеціальних дисциплін та рівнем сучасної техніки в період вивчення загальнотехнічних предметів – машинобудівного креслення, комп'ютерної графіки, матеріалознавства, теоретичної механіки, опору матеріалів, теорії механізмів та деталей машин. Це можливо здійснювати за рахунок відповідного підбору та висвітлення навчального матеріалу і вивчення загальних правил та законів на прикладі об'єктів із майбутньої спеціальності студента – збільшення кількості професійно-орієнтованих прикладів, подання більш розгорнутих докладних пояснень та коментарів, проблемних випадків з історії техніки. Загальноінженерні предмети повинні бути широко інтегровані зі спеціальними, так виконуючи лабораторні роботи з цих дисциплін майбутній судномеханік повинен перший раз брати в руки вимірювальні та монтажні інструменти, працювати зі зразками техніки «в металі», отримувати загальноінженерні знання на прикладі тих об'єктів техніки, з якими він працюватиме в майбутньому на судні. Це забезпечить формування комплексних міцних знань та компетенцій у випускника навчального закладу, відповідність змісту та якості його підготовки високому званню інженера та вимогам ПДНВ. Досягти такої мети можна лише інтенсифікацією вивчення предметів із великим обсягом практичних завдань та виконанням курсових проектів із залученням сучасних знань та технологій проектування. Всі загальноінженерні предмети повинні бути тісно пов'язані і вивчатися комплексно, на об'єктах судового обладнання. Основна робота при уточненні змісту дисциплін лягає на викладача і потребує уважного ставлення та контролю. Зміст спеціальних дисциплін повинен бути, крім іншого, таким, щоб забезпечити виконання курсантами на старших

курсах дипломних проектів чи робіт. Контроль змісту дисциплін можна виконувати, залучаючи до цієї роботи діючих механіків та виконуючи опитування студентів старших курсів, які мають практичний досвід та представників роботодавців, що безпосередньо працюють з випускниками навчальних закладів. Після цього, схема рис. 1 повинна набути вигляду, показаного на рис. 2.



Рис. 2 – Вплив змісту дисциплін на забезпечення рівня компетентності майбутнього судномеханіка після уточнення їх змісту

При забезпеченні наведених заходів щодо коригування змісту дисциплін виникає наступна – друга проблема, пов'язана з особистою компетентністю викладача та якістю його роботи зі студентами. Вплив компетентності самого викладача є одним із ключових, оскільки саме викладач повинен забезпечити знання студентом процесів, що відбуваються в обладнанні, його конструкції, та володіння практичними навичками роботи з ним. Рівень власної компетентності викладача може стати появою на полі рівня компетентності майбутнього спеціаліста, участь у підготовці якого бере викладач, додаткових «чорних дір» (рис. 3), ліквідація яких практично неможлива.

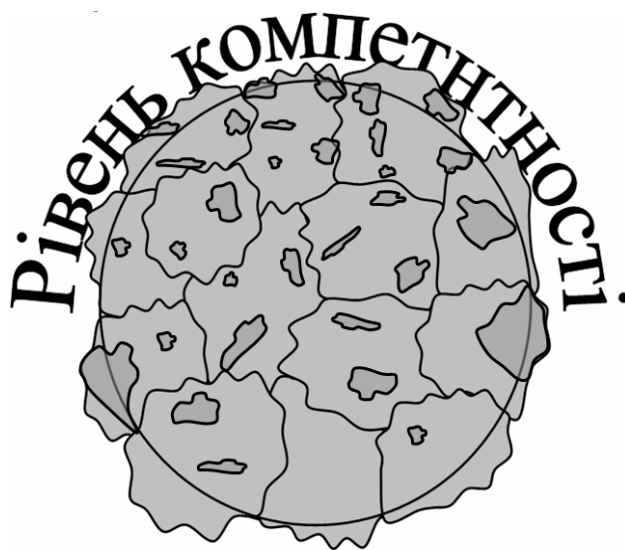


Рис. 3 – Вплив власної компетентності викладача на забезпечення рівня компетентності майбутнього судномеханіка

Компетентного спеціаліста може підготувати виключно компетентний спеціаліст, тому до підготовки судових механіків обов'язково повинні бути залучені саме інженери-механіки, які мають вищу технічну освіту суднобудівного, судномеханічного чи машинобудівного спрямування, досвід роботи в морі чи на виробництві, кандидати та доктори технічних наук, які мають сили та бажання віддавати знання. Початковим критерієм для підбору викладачів повинна бути наявність серйозних публікацій за напрямками, що відповідають дисциплінам, що викладаються ними. Саме викладачі, які працюють зі студентами на молодших курсах повинні зацікавити їх майбутньою спеціальністю, привити бажання отримувати нові знання, прагнення до самоосвіти тощо. До викладання спеціальних дисциплін на молодших курсах повинні бути залучені провідні методисти та педагоги випускових кафедр, які, кожного разу заходячи в аудиторію, розуміють свою відповідальність перед молодим поколінням і бояться розчарувати його. Контроль власної компетентності викладача можуть виконувати: курсанти – шляхом організації їх анонімних опитувань, а також провідні викладачі кафедр та представники роботодавців, яких необхідно залучати до відвідування занять. Важливий інструмент при вирішенні цієї проблеми – організація підвищення кваліфікації викладачів із обов'язковим його контролем.

Третя проблема – побудова навчального процесу, а саме аспекти його безпосередньої організації та відношення до нього студентів. Тут все має велике значення, починаючи від роботи кураторів груп, командирів курсів і деканату, до розстановки дисциплін у розкладі кожного навчального дня та аудиторій, де вони викладаються. Зробивши свої перші кроки по території навчального закладу, студент повинен відчувати панівну роль дисципліни та раціоналізму в навчальному процесі. Дисципліна при цьому повинна проявлятися не стільки в тотальному контролі та безкінечній паперовій пелені рапортів за важливими і неважливими приводами, скільки у вихованні відповідального відношення до навчання. На молодших курсах повинна бути активною робота кураторів та взаємодія їх із батьками, шляхом проведення батьківських зборів, контроль пропусків занять та успішності під час модульних контролів. Як показує практика, серед студентів старших курсів існує значна кількість відповідальних та дисциплінованих особистостей, залучення їх до діагностики і організації навчального процесу повинне дати позитивні результати.

Четверта проблема – забезпечення практичної підготовки студентів на практичних та лабораторних заняттях. Напряму це залежить від стану лабораторної бази. Важливим і прогресивним кроком стає впровадження тренажерів судових енергетичних установок, що дозволить забезпечити компетенції передбачені Кодексом на рівні управління. Для забезпечення попередніх компетенцій, що забезпечують рівень експлуатації, потрібно безпосередньо знайомити майбутніх фахівців із натурними зразками обладнання «в металі», в тому числі діючими. Цього можна досягти, встановлюючи в лабораторіях нове та експлуатоване обладнання – насоси, компресори, сепаратори, теплообмінні апарати, прилади тощо, виготовляючи та впроваджуючи діючі моделі механізмів. Перспективи удосконалення лабораторної бази можуть безперервно встановлюватись за рахунок опитування студентів старших курсів, діючих судових механіків. Під час оснащення лабораторій повинні враховуватись вимоги роботодавців, які враховують специфічні умови роботи випускників навчального закладу (напр., офшорне обладнання).

Сумарний вплив чотирьох проблем на забезпечення рівня компетентності майбутнього судномеханіка показаний на рис. 4. Очевидно, що такий результат підготовки майбутнього фахівця з експлуатації судових енергетичних установок, коли набуття більшої частини компетентностей не забезпечене, не може бути визнаний задовільним. Він обумовлює потребу в розробці та впровадженні відповідного алгоритму реалізації компетентнісного підходу, що дозволить досягти зміни якості підготовки майбутніх фахівців з експлуатації судових енергетичних установок із урахуванням вимог Кодексу ПДНВ.



Рис. 4 – Сумарний вплив основних проблем при впровадженні компетентнісного підходу на забезпечення рівня компетентності майбутнього судномеханіка

Виконаний аналіз проблем на шляху впровадження компетентнісного підходу та факторів, що його обумовлюють дозволяє сформулювати вимоги до алгоритму реалізації компетентнісного підходу при підготовці фахівців з експлуатації судових енергетичних установок. Фактично новий алгоритм повинен відповідати наступним вимогам:

- 1) алгоритм повинен забезпечити рівень компетентності випускника навчального закладу не нижче рівня компетентності, встановленого Кодексом;
- 2) алгоритм повинен забезпечити саморегуляцію навчального процесу (самомоніторинг, самодіагностику, самоконтроль та самовдосконалення);
- 3) саморегуляція повинна бути забезпечена в алгоритмі багатьма паралельними потоками з метою підвищення безвідмовності алгоритму;
- 4) алгоритм повинен забезпечити можливість впливу об'єктів навчального процесу на нього;
- 5) алгоритм повинен забезпечити комплексний взаємний вплив суб'єктів та об'єктів навчального процесу.

Блок-схема, що ілюструє структуру алгоритму показана на рис. 5.

Розгляд розробленої блок-схеми дозволяє розглянути її відповідність встановленим вимогам.

Саморегуляція навчального процесу забезпечена багатьма потоками:

- 1) регуляція за рахунок опитування студентів стосовно змісту дисциплін, що ним викладаються, власної компетентності викладачів, лабораторної бази, організації навчального процесу (потребує забезпечення відсутності стороннього впливу на результати опитувань, анонімності опитувань, на початковому етапі впровадження практично потрібні опитування після кожного заняття);
- 2) регуляція за рахунок діагностики компетентності підготовки студентів навчальним закладом (потребує залучення незалежних компетентних спеціалістів);
- 3) регуляція за рахунок діагностики компетентності студентів роботодавцем.

Можливість впливу об'єкта навчального процесу на його суб'єкти забезпечена моніторингом думки студентів про якість їх навчання і повинна бути врегульована законодавчо.

Взаємний вплив суб'єктів та об'єктів навчального процесу забезпечується наявністю з одного боку жорсткої дисципліни, а з іншого – урахуванням побажань студентів щодо побудови навчального процесу.

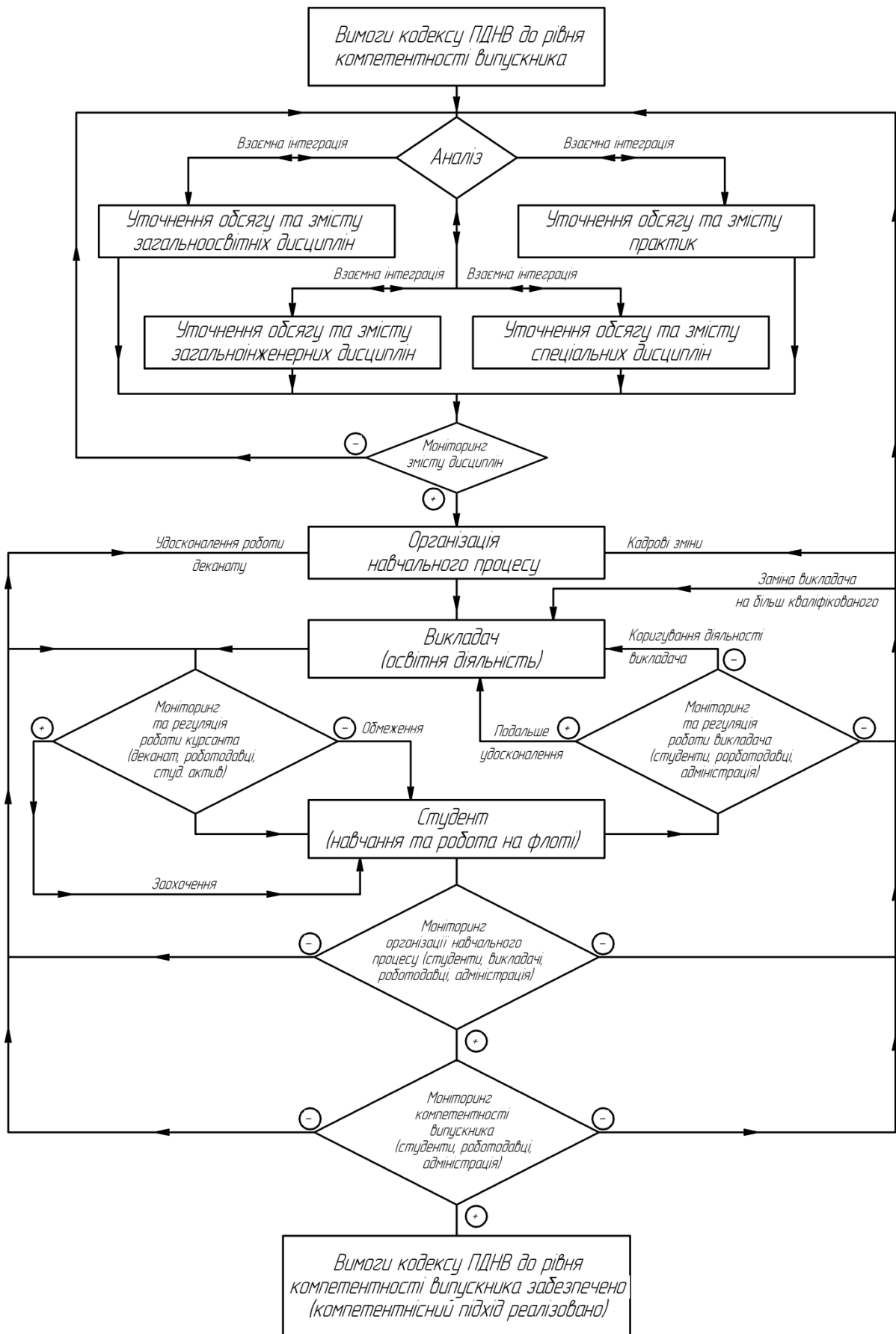


Рис. 5 – Блок-схема алгоритму реалізації компетентнісного підходу при підготовці майбутніх фахівців з експлуатації суднових енергетичних установок

Інструмент, що запропоновано використовувати для діагностики навчального процесу, власної компетентності викладачів та ін. – опитування студентів, не зважаючи на уявну простоту, може дати позитивні результати. Особливо цінне опитування студентів старших курсів, які готуються до захисту, чи вже захистили дипломну роботу або проект. Думка останніх навряд чи може бути упередженою чи заангажованою, оскільки їх компетентність – результат роботи конкретного навчального закладу, а її рівень перевірений роботою на флоті чи під час практик.

**Висновок.** Аналіз проблем щодо впровадження компетентнісного підходу майбутніх фахівців з експлуатації суднових енергетичних установок дозволив запропонувати заходи їх ліквідації та розробити у вигляді блок-схеми алгоритм реалізації компетентнісного підходу. Цей алгоритм, при його впровадженні в навчальний процес, дозволяє забезпечити рівень компетентності випускника навчального закладу не нижче рівня компетентності, встановленого Кодексом, саморегуляцію навчального процесу (самомоніторинг, самодіагностику, самоконтроль та самовдосконалення), саморегуляція забезпечена в алгоритмі багатьма паралельними потоками з метою підвищення його безвідмовності. Алгоритм забезпечує можливість впливу об'єктів навчального процесу на нього та комплексний взаємний вплив суб'єктів та об'єктів навчального процесу. Впровадження запропонованого алгоритму може потребувати значних змін у побудові навчального процесу, поступок деякими класичними освітянськими штампами та рішучих кадрових змін, але дозволить забезпечити підготовку фахівців з експлуатації суднових енергетичних установок із рівнем компетентності не нижче вимог ПДНВ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кодекс з підготовки і дипломування моряків та несення вахти (ПДНВ).
2. Черній Л. В. Компетентнісний підхід у фаховій підготовці майбутніх учителів іноземної мови в університетах США : автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.04 / Л. В. Черній. – Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2011. – 20 с.
3. П'янковська І. В. Компетентнісний підхід у фаховій підготовці майбутніх учителів іноземної мови у вищих навчальних закладах Німеччини : автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.04 / І. В. П'янковська. – Черкаси, 2013. – 20 с.
4. Гурняк І. А. Компетентнісний підхід до формування поняття «хімічне явище» в учнів основної школи : автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.02 / І. А. Гурняк. – К. : НПУ ім. М. Драгоманова, 2010. – 20 с.
5. Гришина И. В. Профессиональная компетентность директора школы. Теория и практика формирования : дис. д-ра пед. наук: 13.00.08 / И. В. Гришина. – СПб., 2004. – 370 с.
6. Гура О. І. Теоретико-методологічні основи формування психолого-педагогічної компетентності викладача вищого навчального закладу в умовах магістратури : автореф. дис. д-ра пед. наук: 13.00.04 / О. І. Гура. – К., 2008. – 36 с.
7. Петрук В. А. Теоретико-методичні засади формування базових професійних компетенцій у майбутніх фахівців технічних спеціальностей : автореф. дис. д-ра пед. наук: 13.00.04 / В. А. Петрук. – К., 2008. – 36 с.
8. Горбатюк Р. М. Теоретико-методичні засади професійної підготовки майбутніх інженерів-педагогів комп'ютерного профілю : автореф. дис. д-ра пед. наук: 13.00.04 / Р. М. Горбатюк. – Тернопіль, 2011. – 48 с.
9. Малик Г. Д. Педагогічні умови реалізації компетентнісного підходу у професійній підготовці майбутнього документознавця : автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.04 / Г. Д. Малик. – Київ, 2011. – 20 с.
10. Галузевий стандарт вищої освіти України. Освітньо-професійна програма підготовки бакалавра. Галузь знань 0701 Транспорт і транспортна інфраструктура. Напрямок підготовки 6.070104 Морський та річковий транспорт. – К. : МОНМС, 2012. – 24 с.

**Проценко В.А., Настасенко В.А. АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

*В статье рассмотрены особенности внедрения компетентностного подхода при подготовке специалистов по эксплуатации судовых энергетических установок. Проанализированы современные требования международных организаций к уровню компетентности этих специалистов. Установлены и проанализированы проблемы подготовки указанных специалистов в отечественных учебных заведениях. На основе выполненных исследований намечены пути решения выявленных проблем и сформулированы основные требования к алгоритму реализации компетентностного подхода, который обеспечит достижение уровня компетентности не ниже заявленного Кодексом ПДНВ. Разработана блок-схема алгоритма, соответствующая установленным требованиям и иллюстрирующая новый алгоритм.*

**Ключевые слова:** компетентностный подход, специалист, эксплуатация судовых энергетических установок.

**Protsenko V.O., Nastasenko V.O. ALGORITHMS TO REALIZE COMPETENCY APPROACH IN TRAINING OF SPECIALISTS IN MAINTENANCE OF SHIP POWER PLANTS**

*The article discloses features of the competency approach implementation in training of specialists qualified in maintenance of ship power plants. The modern requirements of international organizations to the competence level of these specialists are analyzed. The problems of training of such professionals in the local schools are identified and analyzed. On the basis of the research the ways to solve the problems are identified. The basic requirements to the algorithm for competency approach implementation in order to ensure the achievement of the competence level, not lower than the one prescribed by STCW, are established. The block diagram adjusting the requirements and illustrating the new algorithm is designed.*

**Keywords:** competency approach, specialist, maintenance of ship power plants.

© Проценко В.О., Настасенко В.О.

Статтю прийнято  
до редакції 30.11.14



***РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОХОРОНА  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА***

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ПОРИСТОЙ САЖИСТОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Селиванов С.Е., Тригуб С.Н.*

*Херсонская государственная морская академия,*

*Калинчак В.В., Черненко А.С.*

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова*

*Работа посвящена актуальной проблеме – профилактике пожарной опасности, связанной с наличием легковоспламеняющихся и горючих жидкостей на судах, что создает возможность возникновения пожара в результате их воспламенения. Дополнительное присутствие источника зажигания облегчает эту задачу, таким источником зажигания может служить углеродная (сажистая) частица, имеющая способность поглощать тепловое излучение. Именно поглощённое тепловое излучение и определяет критические диаметры самовоспламенения и зажигания углеродных частиц. Цель работы – изучение механизма влияния мощности поглощённого теплового излучения, начального размера и скорости движения углеродной частицы на температуру и время горения, критические диаметры воспламенения и погасания пористой частицы сажи в воздухе комнатной температуры. В результате исследований показана обратная пропорциональная зависимость критического диаметра самовоспламенения от мощности теплового излучения, погасившая углеродная частица не перестаёт нести пожарную опасность.*

**Ключевые слова:** *сажистая частица, пожар, воспламенение, зажигание, тепловое излучение.*

**Введение.** Наличие легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих жидкостей на судах создает возможность возникновения пожара в результате их воспламенения. Дополнительное присутствие источника зажигания облегчает эту задачу. Пожарная опасность образующихся при трении и ударах деталей, сварке с выбросом накалившихся металлических частиц, прежде всего, определяется их температурой, размером и скоростью движения, поэтому необходимо соблюдение техники безопасности при этих работах, особенно при проведении сварочных работ и резке металлов [1, 2].

Другим источником зажигания может служить углеродная (сажистая) частица, имеющая способность поглощать тепловое излучение. Известно, что в воздухе комнатной температуры углеродная частица самопроизвольно не способна перейти на высокотемпературный режим окисления и создать необходимые условия воспламенения газовых смесей, в объеме содержащих пары легковоспламеняющихся жидкостей. Именно поглощённое тепловое излучение и определяет критические диаметры самовоспламенения и зажигания углеродных частиц, выше которых в воздухе комнатной температуры происходит их квазистационарное горение, а затем самопроизвольное погасание [3, 4]. Дополнительное возрастание температуры частицы возможно и за счет гетерогенной каталитической реакции между компонентами газовой смеси.

Обоснование пожарной опасности частицы основано на сравнении времени ее высокотемпературного окисления и времени зажигания паровоздушной смеси ЛВЖ. Для оценки времени зажигания  $t_c$  смеси, предполагая частицу неподвижной, используют метод Зельдовича, а в дальнейшем и метод Калинчака-Михеля [5, 6]:

$$t_{\bar{n}} = \frac{1}{\pi \dot{a}_g} \left( \frac{1}{r_{kr}} - \frac{1}{r_s} \right)^{-2} \quad (1)$$

где  $\dot{a}_g$  – коэффициент температуропроводности смеси, м<sup>2</sup>/с;  $r_s$  – радиус частицы, м;  $r_{kr}$  – критический радиус частицы, м.

Критический размер в данном методе оценивают как

$$r_{kr} = \sqrt{\frac{\lambda_g (T_s - T_g)^2 E}{2Q\rho_g Z_{cop} RT_s^2 k_0} \exp\left(\frac{E}{RT_s}\right)} \quad (2)$$

где  $T_s$  – температура поверхности частицы, К;  $T_g$  – температура газовой смеси, К;  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности смеси, Вт/(м·К);  $Q$  – тепловой эффект реакции на килограмм горючего, Дж/кг;  $Z_{cop}$  – относительная массовая концентрация горючего,  $\rho_g$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель, 1/с;  $E$  – энергия активации реакции, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Как видно, критический радиус частицы, а с ним время зажигания, существенно зависит от температуры поверхности частицы.

**Цель работы.** Изучить механизм влияния мощности поглощённого теплового излучения, начального размера и скорости движения углеродной частицы на температуру и время горения, критические диаметры воспламенения и погасания пористой частицы сажи в воздухе комнатной температуры.

**Результаты исследований.** Данное исследование является продолжением работ [3, 7]. Объектом исследования является пористая частица сажи, поглощающая тепловое излучение в воздухе комнатной температуры. В результате нагрева на ее поверхности и внутри пор возрастают скорости параллельных экзотермических реакций {реакция I –  $C + O_2 = CO_2$ , реакция II –  $2C + O_2 = 2CO$ }.

Задачи исследования сводятся: 1 – исследование стадийных закономерностей временных зависимостей диаметра и плотности частицы сажи, скоростей образования угарного газа и углекислого газа, температуры частицы и её производной (для определения характерных температур и длительностей стадий); 2 – исследование критических характеристик самовоспламенения и самопроизвольного погасания; 3 – изучение закономерностей влияния диаметра частицы на период индукции, максимальную температуру и время горения при различных мощностях поглощённого теплового излучения.

В результате совместного действия химического тепловыделения и поглощённого тепла происходит воспламенение частицы сажи, если диаметр частицы больше диаметра воспламенения. Это означает – переход частицы на режим квазистационарного горения (высокотемпературное окисление), который характеризуется не только высокой температурой, но и высокой скоростью реагирования углерода с окислителем воздуха, что способствует значительному уменьшению диаметра и плотности частицы. Уменьшение диаметра частицы в процессе её горения приводит к росту коэффициента теплоотдачи и уменьшению температуры горения. При достижении диаметра и температуры критических значений происходит самопроизвольное погасание – т.е. переход на режим медленного окисления частицы сажи. Период индукции воспламенения (время воспламенения) определяется суммой длительностей двух стадий: 1 – стадия прогрева и самоускорения; 2 – стадия нестационарного горения и достижения квазистационарной температуры горения.

Для выяснения влияния мощности поглощённого теплового излучения на времена воспламенения и горения частицы, температуру высокотемпературного окисления и параметры самопроизвольного погасания необходимо рассмотреть временные зависимости температуры, диаметра и скоростей реакций (рис. 1).

В воздухе комнатной температуры для самовоспламенения частицы необходимо направить на нее излучение с интенсивностью выше некоторого критического значения [1, 3]. Точки – это эксперимент Букатого и Суторихина [6], при  $I = 1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>,  $K_\alpha = 0,38$ ,  $q_{h,ads} = K_\alpha I / 4$ . Расчеты проводились для частицы сажи:  $Q_1 = 12,343$  МДж/кгO<sub>2</sub>,  $Q_2 = 6,844$  МДж/кгO<sub>2</sub>;  $E_1 = 167000$  Дж/моль [8, 9];  $F_{v0} = 2 \cdot 10^5$  м<sup>-1</sup>,  $\rho_{real} = 1600$  кг/м<sup>3</sup>.

Постоянные:  $\rho_{g0} = 0.277 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda_{g0} = 8,19 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $c_{g0} = 1110 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $T_0 = 1273 \text{ К}$ ;  $c_c = 780 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\rho_{cb} = 525 \text{ кг/м}^3$ ;  $U_b = 0 \text{ м/с}$ ,  $\varepsilon = 0.78$ ;  $n = 0,75$ .

Временные зависимости температуры и диаметра частицы сажи, временной производной температуры и массовых скоростей образования продуктов реакции показаны на рис. 1.

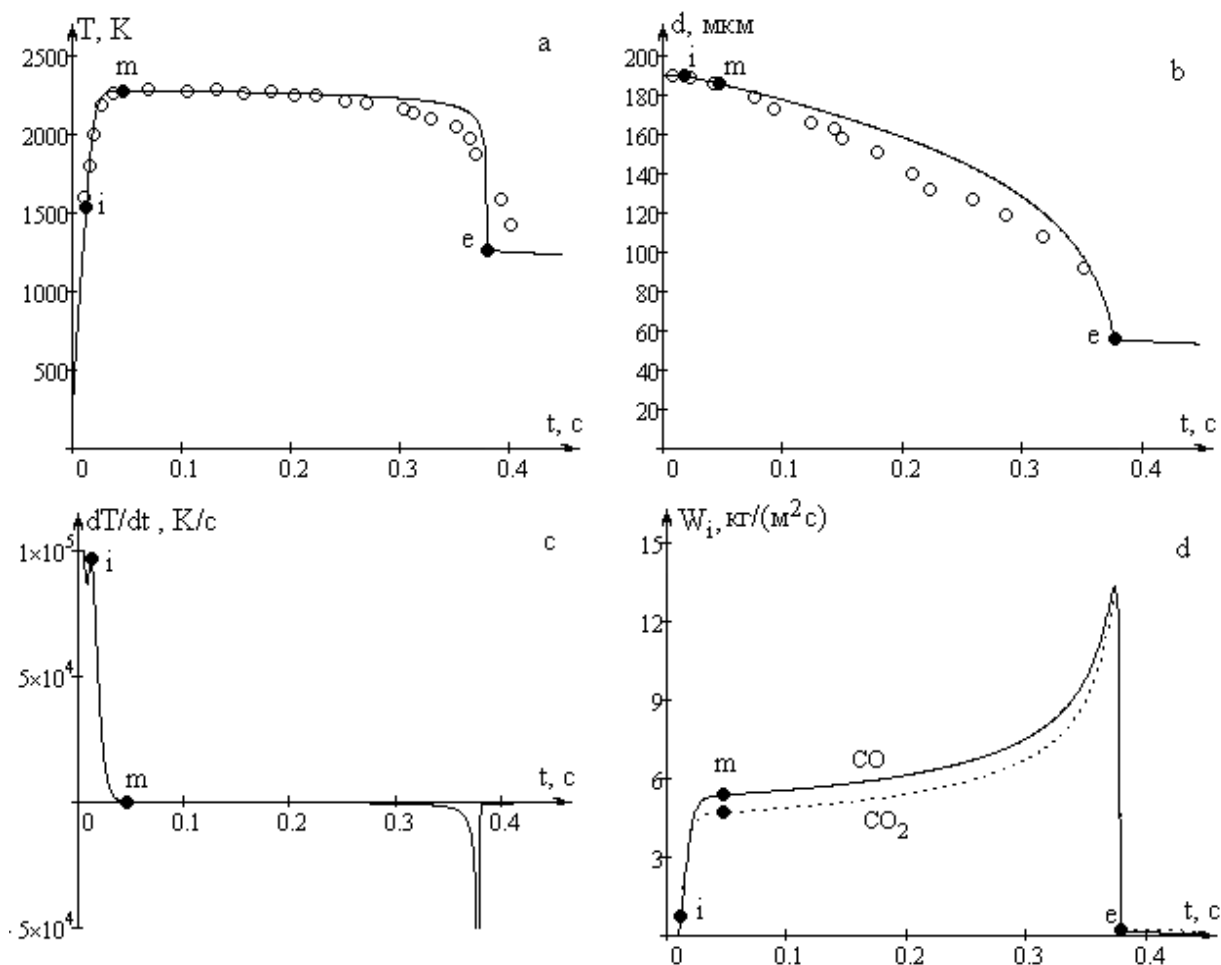


Рис. 1 – Временные зависимости температуры и диаметра частицы сажи, временной производной температуры и массовых скоростей образования продуктов реакции:  
а)  $T(t)$ , б)  $d(t)$ , в)  $dT/dt(t)$ , г)  $W_i(t)$

Используемые параметры:  $d_b = 190 \text{ мкм}$ ,  $Z_{O_2,\infty} = 0,23$ ,  $U_b = 0 \text{ м/с}$ ,  $T_b = 293 \text{ К}$ ,  $q_{h,ads} = 1,52 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T_g = T_w = 293 \text{ К}$ , о – эксперимент Букатого и Суторихина [6]

Как видно из рис. 1, в общем случае время выхода на высокотемпературный режим можно разбить на несколько стадий, которые условно разделены точками перегиба на временной зависимости температуры частицы. Время достижения первой точки перегиба характеризует время инертного прогрева, когда скорость реакции пренебрежимо мала. Далее с ростом температуры частицы роль химического тепловыделения становится существенной. Достижение второй точки перегиба (точка **i**) можно определить как окончание периода индукции и начало высокотемпературного окисления, когда скорость реакции резко начинает возрастать (рис. 1d). Квасистационарное окисление частицы (малая скорость изменения температуры) наступает спустя некоторое время, которое в случае поглощения теплового излучения можно соотнести с достижением максимальной температуры горения углеродной частицы (точка **m**, рис. 1с).

В дальнейшем в процессе горения с уменьшением диаметра и плотности частицы наблюдается медленное падение квазистационарной температуры горения. Это объясняется возрастанием молекулярно-конвективного теплообмена единицы

поверхности за счет увеличения коэффициента теплообмена с уменьшением диаметра углеродной частицы. В тоже время химическое тепловыделение за счет увеличения коэффициента массопереноса кислорода к единице поверхности частицы возрастает в меньшей степени.

После достижения критических значений  $d_e$  и  $\rho_e$  резко уменьшалась температура частицы, и пористая углеродная частица самопроизвольно погасала – горение частицы прекращалось, скорость реакций резко уменьшалась, и начиналось её низкотемпературное окисление. Время от окончания воспламенения (точка **i**) до момента самопроизвольного погасания (точка **e**) определялось как время горения частицы. Именно данное время необходимо анализировать для оценки ее пожарной опасности.

На рис. 2 представлено влияние начального размера частицы на период индукции, время горения, максимальную температуру горения и диаметр при самопроизвольном погасании.

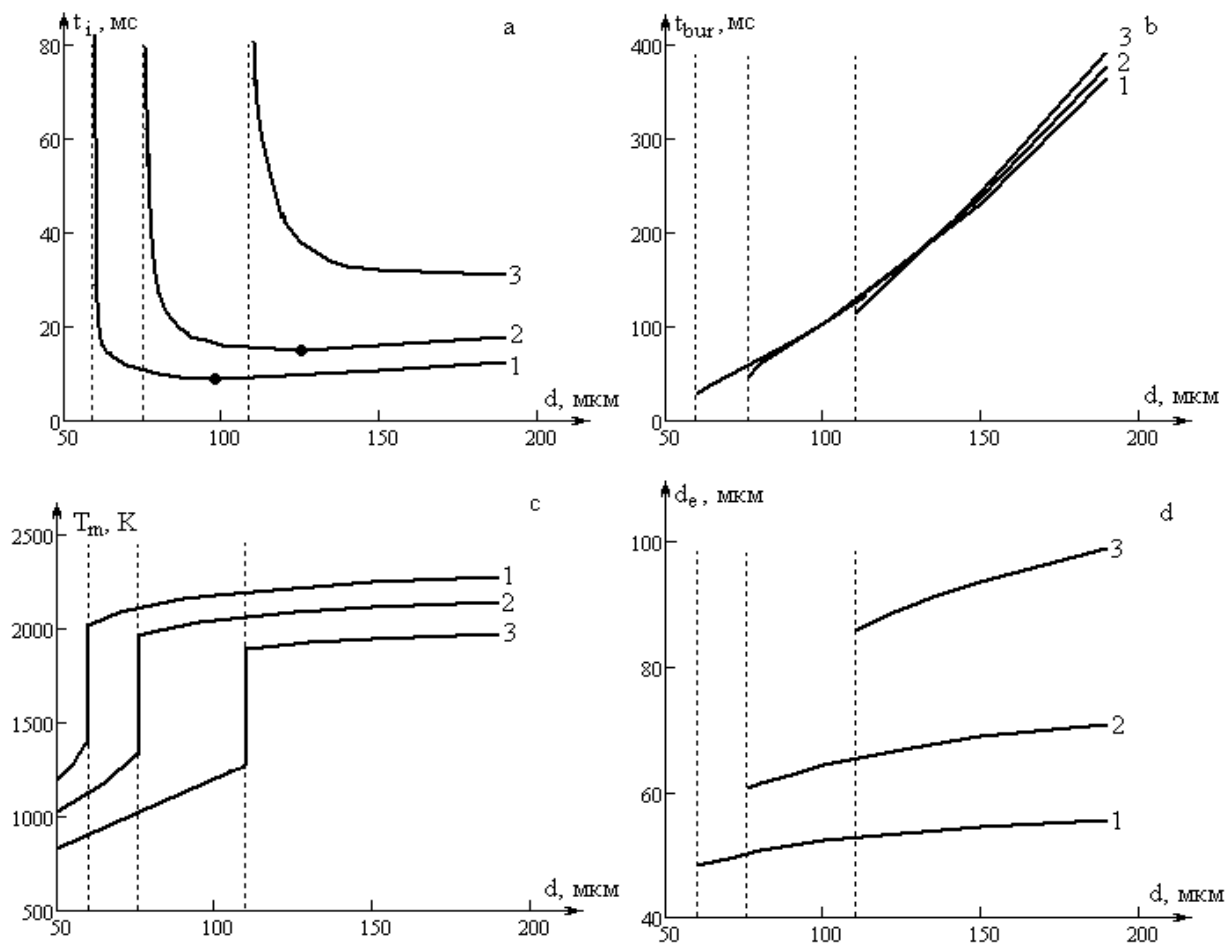


Рис. 2 – Влияние размера углеродной частицы на период индукции, время горения, максимальную температуру горения и диаметр при самопроизвольном погасании

Температура газа  $T_g = T_w = 293$  К,  $T_b = 293$  К,  $Z_{O_2} = 0.23$ . Мощность поглощенного теплового излучения  $q_{h,ads}$ : 1 –  $1,52 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, 2 –  $1,14 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, 3 –  $0,76 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>

Отметим, что на зависимости периода индукции от диаметра частицы наблюдается две характерные особенности. Во-первых, существует некий минимальный (критический) размер частицы (рис. 2а), ниже которого частица не самовоспламеняется в воздухе комнатной температуры при поглощении теплового излучения. Температура частицы при этом существенно ниже, чем для высокотемпературного режима окисления. Наличие критического диаметра объясняется возрастанием теплоотдачи с единицы поверхности частицы к холодному газу при уменьшении размера частицы. Увеличение мощности поглощенного излучения уменьшает не только период индукции, но и обратно пропорционально критический размер воспламенения частицы.

Во-вторых, на зависимости периода индукции от диаметра наблюдается минимум, который смещается в область больших размеров с уменьшением мощности поглощенного теплового излучения. Слева от точки минимума уменьшение периода индукции связано с уменьшением теплоотдачи единицы поверхности частицы с ростом диаметра. Справа от точки минимума небольшое увеличение времени выхода на высокотемпературный режим в связи с возрастанием времени инертного прогрева частицы большего диаметра.

С уменьшением мощности поглощенного теплового излучения практически монотонно уменьшается температура высокотемпературного окисления. Именно это объясняет увеличение среднего диаметра самопроизвольного погасания сажиистой частицы, в результате возрастания относительной роли теплоотдачи от частицы. Поэтому наблюдается слабое влияние мощности поглощенного излучения (рис. 2b) на время горения частицы. Диаметр частицы при самопроизвольном погасании также слабо (изменение до 10 %) зависит от начального размера частицы. Отметим, что погасшая частица продолжает нести пожарную опасность, т.к. поглощение более мощного излучения способна снова воспламениться (рис. 2d).

Высокотемпературное окисление углеродной частицы протекает в переходной, близкой к диффузионной, области (число Семенова больше 3). Поэтому время горения возрастает пропорционально квадрату начального диаметра частицы (рис. 2b).

Ввиду того, что зачастую частицы при попадании в газовую среду, содержащую пары ЛВЖ, являются движущимися, важно проанализировать влияние относительной скорости на рассматриваемые характеристики. Влияние скорости двояко. С одной стороны возрастает роль вынужденной конвекции и, как следствие, теплоотдачи от частицы к газу. С другой стороны увеличивается приток кислорода к единице поверхности, в результате чего возрастает скорость химической реакции при высокотемпературном окислении частицы.

Анализ показал, что для частиц от 50 до 200 мкм наблюдается уменьшение максимальной температуры горения с ростом скорости частицы, что говорит о более сильном ее влиянии на теплоотдачу. Именно поэтому при большем диаметре частицы наблюдается самопроизвольное погасание, что приводит к уменьшению времени горения.

Однако изменение скорости частицы диаметром 100–200 мкм от 0 до 10 м/с незначительное. В момент максимальной температуры (точка m) число Нуссельта возрастает от 2 до 3, что приводит к уменьшению температуры всего лишь в пределах 50 К. В тоже время период индукции меняется в 1,5 раза, а время горения только на 20 %.

**Выводы.** Поглощение теплового излучения способно привести к устойчивому горению углеродной частицы в газовой смеси комнатной температуры, содержащей кислород. Время и температура высокотемпературного окисления частицы определяется не только мощностью поглощенного теплового излучения, но и диаметром и относительной скоростью углеродной частицы. Показана обратная пропорциональная зависимость критического диаметра самовоспламенения от мощности теплового излучения. Погасшая углеродная частица не перестает нести пожарную опасность. Дальнейшие лабораторные исследования с углеродной частицей в потоке лазерного излучения будут проведены в лаборатории пожарной безопасности и физики горения кафедры БЖД на море Херсонской государственной морской академии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Взрывобезопасность электрических разрядов и фрикционных искр / Под ред. В. С. Кравченко. – М., Недра. – 1976. – 76 с.
2. Иващенко П. Ф. Исследование механизма искрообразования и поджигающей способности фрикционных искр / П. Ф. Иващенко, В. А. Меньшаков, В. И. Толчинский // Взрывоопасность в строительстве. – М. : МИСИ, 1983. – С. 34-44.
3. Калинин В. В. Влияние поглощенного теплового излучения углеродной частицы на пожарную опасность в рабочей зоне судна / В. В. Калинин, С. Е. Селиванов,

С. Н. Тригуб, А. С. Черненко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 2. – С. 102-110.

4. Букатый В. И. Высокотемпературное горение углеродных частиц в поле интенсивного лазерного излучения / В. И. Букатый, И. А. Суторихин // Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24, № 3. – С. 9-11.

5. Селиванов С. Е. Воспламенение, зажигание, горение и самопроизвольное погасание углеродной частицы в рабочей зоне / С. Е. Селиванов, С. Н. Тригуб, В. В. Калинин, А. С. Черненко, А. А. Кузьмин // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. – № 1. – С. 139-142.

6. Калинин В. В. К стационарной теории гетерогенного воспламенения и потухания частицы в нагретом газообразном окислителе / В. В. Калинин, С. Г. Орловская // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т. 55, № 2. – С. 232-236.

7. Калинин В. В. Время зажигания паровоздушных легковоспламеняющихся жидкостей фрикционными искрами / В. В. Калинин, М. М. Краснянский, Ю. М. Михель // Физика аэродисперсных систем. – 1983. – № 32. – С. 69-73.

8. Калинин В. В. Горение и самопроизвольное погасание пористых углеродных частиц в азотно-кислородных смесях комнатной температуры / В. В. Калинин, А. С. Черненко // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 80-88.

9. Основы практической теории горения : учебное пособие для вузов // В. В. Померанцев. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

**Селіванов С.Є., Тригуб С.М., Калинин В.В., Черненко О.С. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРІННЯ ПОРИСТОЇ САЖИСТОЇ ЧАСТИНКИ ПІД ЧАС ПОГЛИНАННЯ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.**

*Робота присвячена актуальній проблемі – профілактиці пожежної небезпеки, пов'язаної з наявністю легкозаймистих і горючих рідин на судах, що створює можливість виникнення пожежі в результаті їх займання. Додаткова присутність джерела запалювання полегшує це завдання, таким джерелом запалювання може служити вуглецева (сажиста) частка, що має здатність поглинати теплове випромінювання. Саме поглинене теплове випромінювання і визначає критичні діаметри самозаймання та запалювання вуглецевих частинок. Мета роботи – вивчення механізму впливу потужності поглиненого теплового випромінювання, початкового розміру і швидкості руху вуглецевої частинки на температуру і час горіння, критичні діаметри займання і згасання пористої частинки сажі в повітрі кімнатної температури. У результаті досліджень показана зворотна пропорційна залежність критичного діаметра самозаймання від потужності теплового випромінювання, погасла вуглецева частка не перестав нести пожежну небезпеку.*

**Ключові слова:** сажиста частинка, пожежа, займання, запалювання, теплове випромінювання.

**Selivanov S.E., Trigub S.N. Kalinchak V.V., Chernenko A.S. COMBUSTION CHARACTERISTICS OF POROUS SOOT PARTICLES DURING ABSORPTION OF THERMAL RADIATION**

*The paper is devoted to a sore problem - prevention of fire hazards associated with the presence of flammable and combustible liquids on ships, which enhances the risk of fire in case of their inflammation. The additional presence of ignition source increases the possibility mentioned. Carbon (soot) particles having the ability to absorb thermal radiation may easily serve as a source of ignition. Particularly, the absorbed heat radiation determines the critical diameter of the self-ignition and ignition of the carbon particles. The aim of the article is to identify the influence of the power absorbed heat radiation, the initial size and the speed of movement of carbon particles on the temperature and combustion time, the critical diameter of the ignition and extinction of porous particles of soot in the air at a room temperature. The studies have shown inverse proportional dependence of the critical diameter of self-ignition on the power of thermal radiation. The extinguished carbon particle does not cease to bear fire hazard.*

**Keywords:** smoke particles, fire, ignition, ignition, heat radiation.

© Селіванов С.Є., Тригуб С.М., Калинин В.В., Черненко О.С.

Статтю прийнято  
до редакції 11.11.14



## **ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ**

## КОМПЕНСАЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Алексенко В.Л., Букетов А.В., Браило Н.В., Белошицкий С.А.*

*Херсонская государственная морская академия*

*Создано специализированное программное обеспечение для обработки методом наименьших квадратов результатов испытания образцов материалов на чистый изгиб. Программа, которая написана на распространённом языке высокого уровня Pascal ABC, предлагается в исходных кодах, снабжена исчерпывающими комментариями и позволяет рядовым пользователям производить её дальнейшие модификации. Алгоритм обеспечивает компенсацию систематической погрешности установки нуля силоизмерителя нагружающего устройства.*

**Ключевые слова:** программное обеспечение, ошибка эксперимента, эпоксидный композит.

**Введение.** Одним из базовых направлений развития материаловедения должны стать разработка и производство конструкционных материалов с заранее заданными свойствами. Эти материалы вытесняют традиционную низколегированную судостроительную сталь и становятся важным элементом предстоящей на водном транспорте технологической революции. Современные разработки должны включать масштабные теоретические и экспериментальные исследования по конструированию и прогнозированию свойств перспективных композитных материалов, среди которых важное место занимают эпоксикомпозиты [1].

**Состояние вопроса.** Теоретическое определение механических свойств новых конструкционных материалов с приемлемой для практики точностью в большинстве случаев вызывает значительные трудности на современном этапе развития материаловедения. В частности до настоящего времени не разработан аппарат прогнозирования физико-механических свойств композитов на основе эпоксидной смолы ЭД-20. В любом случае результаты расчётов подлежат экспериментальной проверке.

Механические константы конструкционных материалов определяют наиболее важные эксплуатационные свойства и включают характеристики прочности и жёсткости. Их обычно находят при обработке результатов испытаний стандартных образцов на растяжение–сжатие или изгиб.

В рассматриваемом случае результаты испытаний могут быть зарегистрированы одним из способов:

– с помощью диаграммного аппарата, которым обычно снабжаются универсальные испытательные машины. Диаграммный аппарат позволяет в определённом масштабе записывать зависимость  $P = f(\Delta l)$  между усилием  $P$  и абсолютной продольной деформацией образцов  $\Delta l$ ;

– при испытании образцов на чистый изгиб, в том числе на машинах без диаграммного аппарата, по показаниям динамометра и механического датчика перемещений в виде таблицы  $P=f(w)$ .

Обе зависимости (графическая и табличная) могут быть приведены к виду

$$\sigma = f(\varepsilon), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – нормальные напряжения при растяжении или в крайних продольных волокнах образца при испытаниях на чистый изгиб;  $\varepsilon$  – относительная деформация.

Некоторые материалы, в частности малоуглеродистая конструкционная сталь, обладают выраженным начальным линейным участком, на котором он подчиняется закону Гука при растяжении–сжатии:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости (Юнга). В пределах упругости нелинейные начальные участки диаграмм заменяют на практике секущими прямыми и в расчётах используют так называемый секущий модуль  $E_c$ . Модуль Юнга является механической константой характеризующей жёсткость материала, а его определение для новых материалов является одной из первоочередных задач.

**Постановка проблемы.** Поскольку результаты любых измерений содержат систематическую и случайную погрешности, последняя должна быть минимизирована путём многократных измерений, а результаты следует представить достаточно простой аналитической зависимостью. При этом желательно также выявить и компенсировать систематическую погрешность. Одним из наиболее эффективных способом обработки результатов наблюдений является метод наименьших квадратов (МНК) [2].

*Суть МНК.* Пусть задана таблица  $\bar{f}_j(x_j) j=1,2...m$  с результатами некоторого физического эксперимента. Очевидно, что каждый результат измерений содержит погрешность  $\Delta_j = f_j(x_j) - \bar{f}_j(x_j)$ , величина которой, как и точные значение  $f_j(x_j)$  неизвестны. Ставится задача наилучшего, по-некоторому критерию, приближения функции  $f(x)$  выражением, которое содержит неизвестные параметры  $a_i$ , подлежащие определению, например, полиномом степени  $n < m$ :

$$f(x) = \sum_{i=0}^{i=n} a_i x^i. \quad (3)$$

Способ подбора коэффициентов, обеспечивающий минимальную сумму квадратов отклонений значений полинома (3) или иной аппроксимирующей функции от заданной (таблицей, дифференциальным уравнением и др.), называется методом наименьших квадратов. В рассматриваемом случае для определения коэффициентов  $a_k$  аппроксимирующего полинома (3) способ требует решить нормальную систему уравнений линейных относительно указанных коэффициентов:

$$\sum_{i=0}^n a_i \sum_{j=1}^m x_j^{i+k} = \sum_{j=1}^m \bar{f}_j x_j^k; i, k = 0, 1 \dots n; j = 1, 2 \dots m. \quad (4)$$

В интернете распространяются многочисленные программы, реализующие этот метод. Их общим недостатком является то, что предлагаются они в исполняемых кодах. Последнее не позволяет учитывать особенности конкретных задач обработки результатов наблюдений.

**Цели исследования.** В настоящем исследовании поставлены задачи:

- создание программного продукта в исходных кодах для математико-статистической обработки результатов испытания образцов конструкционных материалов на чистый изгиб;
- программа должна быть написана на распространённом языке программирования высокого уровня и подробно комментироваться с целью облегчения её модификаций рядовыми пользователями под конкретные задачи исследований;
- апробировать программу в задачах, решаемых в НИЛ «Полимерные композитные материалы в судостроении» Херсонской государственной морской академии (далее в тексте «Лаборатория») с получением статистических оценок ошибок наблюдений.

**Основное содержание работы.** Обработка результатов испытания призматических образцов на изгиб по 4-х точечной схеме.

На рис. 1 представлена расчётная схема испытания образца из композита на основе эпоксидной смолы ЭД-20 на машине МИП-100. Приспособление, состоящее из двух траверс с шарнирными опорами, позволяет создавать на среднем участке образца деформацию чистого изгиба.

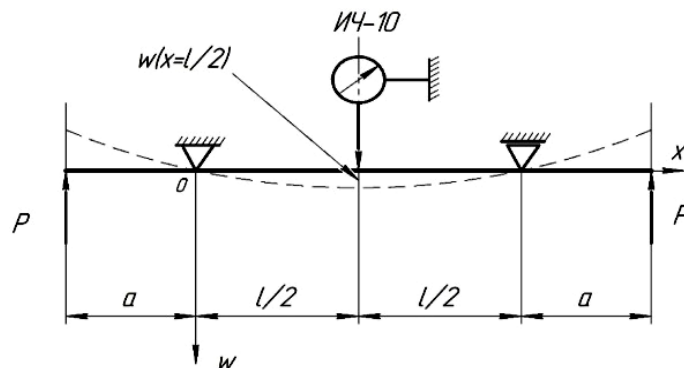


Рис. 1 – Расчётная схема испытаний на чистый изгиб

Прогиб в середине пролёта балки:

$$w(x=l/2) = Pa^2/(8EI). \quad (5)$$

Откуда:

$$E = Pa^2/(8Iw(x=l/2)), \quad (6)$$

или с учётом, что для прямоугольного поперечного сечения  $I = bh^3/12$  получим:

$$E = k P/w, \text{ где } k = 1,5 a(l/h)^2/A. \quad (7)$$

Здесь  $A=bh$ ,  $b$  и  $h$  соответственно ширина сечения образца и его высота в плоскости изгиба.

Погрешность определения модуля продольной упругости  $E$  по формуле (7) складывается из погрешностей определения коэффициента  $k$  и отношения  $P/w$ .

Погрешность  $k$  включает систематическую и случайную составляющие. Случайная составляющая может быть уменьшена увеличением точности изготовления и измерения геометрических параметров образца и нагружающего устройства. Систематическая погрешность связана с принятой физической моделью деформируемого тела (однородный изотропный брус, подчиняющийся гипотезе плоских сечений и закону Гука) и некоторыми другими факторами. Для эпоксикомпозитных материалов существенная часть этой погрешности обусловлена технологической неоднородностью материала, в том числе за счёт оседания частиц наполнителя под действием сил тяжести в процессе отвердевания. Случайная погрешность  $\Delta_{сл}(P/w)$  определения отношения  $P/w$  геометрически суммируется из случайных погрешностей силоизмерителя и датчика перемещений:

$$\Delta_{сл}(P/w) = (P/w)[(\Delta P/P)^2 + (\Delta w/w)^2]^{0,5}. \quad (8)$$

Поскольку относительная погрешность силоизмерителя испытательной машины, как правило, существенно превышает относительную погрешность регистрации прогибов датчиками перемещений МИГ-1 или ИЧ-10, то попытки снижения последней будут малоэффективными.

Следовательно, работу по увеличению точности экспериментов следует сосредоточить на возможно более точном градуировании силоизмерителя и отмеченной выше точностью изготовления и замеров параметров образцов.

**Особенности программной реализации МНК.** Для устранения отмеченных выше проблем, возникающих при использовании общедоступного программного обеспечения, разработана программа МНК123Е на языке Pascal ABC для одновременного представления полиномами 1, 2, и 3 степеней результатов испытания призматических образцов на чистый изгиб. В программе реализуют алгоритм вычисления коэффициентов и свободных членов нормальной системы (4), её решение по правилу Крамера, вычисления полиномов (3), а также дисперсий, стандартного отклонения и касательного модуля Юнга в начале координат. Некоторые результаты исследовательских расчётов представлены на рис. 2, где полиномами второй степени аппроксимируются данные, полученные при испытаниях на изгиб образцов из эпоксикомпозитов.

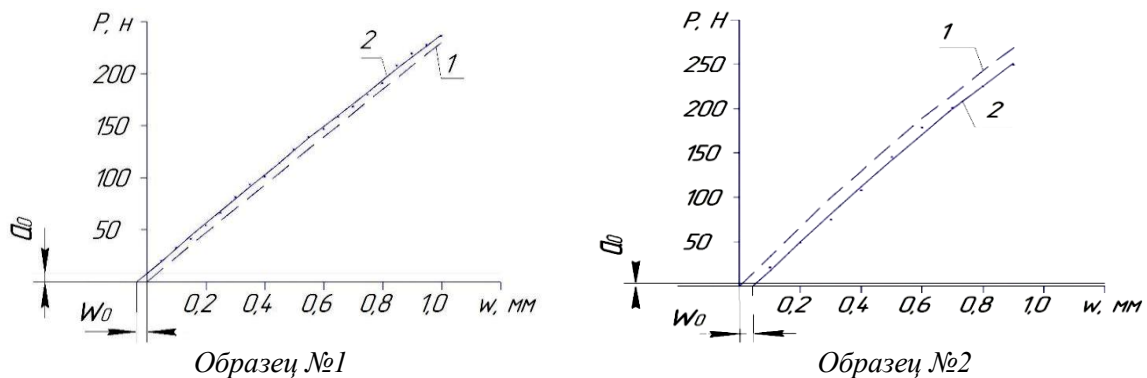


Рис. 2 – Графики аппроксимирующих полиномов:  
1 – в программе МНК123Е (пунктир); 2 – в программе МНК012Е

**Анализ результатов обработки экспериментов.** Обработка результатов, полученных при испытаниях на чистый изгиб серии композитных образцов с матрицей на основе эпоксидной смолы ЭД 20 с помощью программы МНК123Е, показала следующее:

- устойчивость вычислительного алгоритма;
- наличие лишней степени свободы у полинома  $n=3$ , приводящей к несуществующему перегибу графика функции;
- определённые расхождения результатов определения начального модуля Юнга с результатами его независимого определения для тех же образцов динамическим методом [3], разработанным в «Лаборатории» (табл. 1).

Последнее обстоятельство позволило предположить наличие систематической ошибки постоянной в каждом эксперименте, обусловленной начальной настройкой нуля силоизмерителя и обжатием образца на опорах. В результате жёсткой привязки аппроксимирующего полинома (3) к началу координат и указанной погрешности, его график в окрестностях начала координат получает дополнительную кривизну, а начальный модуль Юнга соответствующую дополнительную погрешность.

Таблица 1 – Результаты определения модуля Юнга

Номер образца	В программе МНК123 $E_c$ (ГПа)	В программе МНК012 $E_c$ (ГПа)	Динамический метод $E_d$ (ГПа)
1	3,91	3,76	3,47
2	4,16	4,76	4,31

С целью компенсации указанного недостатка и, следовательно, существенной части самой систематической погрешности, программа МНК123Е была модифицирована в варианте МНК012Е. Для этого в алгоритм были внесены следующие изменения:

- аппроксимирующий полином не зависит от начала координат, т.е. используют его полную форму (3) при  $i=0,1,2$  и рассчитывают коэффициенты  $a_i$ , при которых график пересекает ось « $OP$ » в точке  $P = a_0$ ;
- выполняют расчёт откорректированных значений нагрузки  $P$  по формуле (3) при  $a_0=0$ , что означает сдвиг оси « $OW$ » на ранее вычисленное значение  $a_0$ .

Как следует из табл. 1, в последнем случае наблюдают лучшее соответствие результатов определения начального модуля продольной упругости статическим и динамическим методами.

**Выводы.** Создано специализированное программное обеспечение для обработки методом наименьших квадратов результатов испытания образцов материалов на чистый изгиб, обладающее следующими преимуществами:

- программа, написана на распространённом языке высокого уровня Pascal ABC, предлагается в исходных кодах, снабжена исчерпывающими комментариями и позволяет рядовым пользователям производить её дальнейшие модификации;
- алгоритм обеспечивает компенсацию систематической погрешности установки нуля силоизмерителя нагружающего устройства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букетов А. В. Перспективы и проблемы разработки навах композитных материалов для нужд южного судостроительного региона Украины / А. В. Букетов, В. Л. Алексенко, Н. П. Знамеровская // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО–2012)», (10–12 жовтня 2012 року, м. Херсон). – Херсон : Видвництво ХДМА, 2012. – С. 168-170.

2. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1958. – 336 с.

3. Алексенко В. Л. Определение механических констант конструкционных материалов динамическим испытанием призматических образцов / В. Л. Алексенко, В. О. Скирденко, С. С. Шварц // Науковий вісник ХДМА. – 2013. – № 2 (9). – С. 153-160.

**Алексенко В.Л., Букетов А.В., Браїло М.В., Білошицький С.А.** КОМПЕНСАЦІЯ СИСТЕМАТИЧНОЇ ПОМИЛКИ ПРИ ОБРОБЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Створено спеціалізоване програмне забезпечення для обробки методом найменших квадратів результатів випробування зразків матеріалів на чистий вигин. Програма, яка написана на поширеній мові високого рівня Pascal ABC, пропонується у вихідних кодах, забезпечена вичерпними коментарями і дозволяє пересічним користувачам розробляти її подальші модифікації. Алгоритм забезпечує компенсацію систематичної похибки установки нуля силовимірювача навантажувального пристрою.*

**Ключові слова:** програмне забезпечення, помилка експерименту, епоксидний композит.

**Alexenko V.L., Buketov A.V., Braila N.V., Beloshitsky S.A.** COMPENSATION OF SYSTEMATIC ERRORS DURING RESULTS PROCESSING OF STRUCTURAL MATERIALS MECHANICAL TESTING

*Specialized software for results processing of materials samples tests to pure bending using least-squares method was created. The programme written with common high-level language Pascal ABC, is available in source code; it is provided with exhaustive commentaries and allows ordinary users to make further modifications. The algorithm provides compensation of systematic error of zero of loading device weighting.*

**Keywords:** software, experimental error, epoxy-filled composite.

© Алексенко В.Л., Букетов А.В., Браїло М.В., Білошицький С.А.

Статтю прийнято  
до редакції 30.10.14.

УДК 621.762

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТУ Ti-TiB-TiC

*Биба Є.Г., Лобода П.І.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

*Встановлено, що формування титан-матричного композиту залежить не лише від розміру та кількості фазових складових, що формуються в результаті дифузійної взаємодії, а й від концентрації вихідних компонентів, температури та часу. Методами оптичної мікроскопії, рентгенофазового та рентгеноструктурного аналізів встановлено, що отриманий композит являє собою матрицю з титану пронизану голкоподібними включеннями бориду титану та дрібними дендритними включеннями карбіду титану. Встановлено що при швидкісному електронно-променевому спіканні вдалося отримати композит з вищими механічними характеристиками ніж при радіаційному. Комплексні дослідження закономірностей формування структури сплаву титан-матричного композиту Ti-TiB-TiC залежно від кількості добавок карбіду бору у вихідну суміш та методу спікання, можуть бути ефективно використані для виготовлення титанових сплавів замість промислових сплавів авіаційної техніки.*

*Ключові слова:* гідрид титану, карбід бору, твердість, титан-матричний композит.

**Вступ.** В теперішній час в Україні існує гостра необхідність у розробці та виробництві великої гама надміцних та надтвердих матеріалів. В сучасному матеріалознавстві особливо цікавими є боридо- та карбідомісткі керамічні матеріали, унікальні фізико-механічні властивості яких вже зараз обумовлюють застосування їх у багатьох галузях машинобудування. Так, велика мікротвердість дає змогу використовувати ці матеріали для обробки та різання металів та гірських порід; високі значення модулів Юнга, порівняно мала густина та деякі особливості руйнування роблять можливим створення елементів керамічної броні; високі температури плавлення, жаро- та корозійностійкість зумовлюють можливість їхнього використання для роботи в екстремальних умовах [1].

Але кераміка крихка і маломіцна, що не дозволяє виготовляти конструкційні елементи з малою площею поперечного перетину. Підвищення міцності таких матеріалів може досягатися за рахунок введення в них пластичної фази, за рахунок збільшення ефективної енергії руйнування шляхом подрібнення зерна, створенням внутрішніх стискаючих напружень на шляху пересування тріщини, армування волокнами, тощо. Із всіх відомих методів зміцнення крихких керамічних матеріалів, тільки армування керамічними волокнами дає змогу значно підвищити міцність та в'язкість руйнування, при збереженні рівня твердості та жорсткості.

Використання карбіду бору [2, 3] як легуючу добавку до титан-матричного композиту дає змогу отримати матеріал складу Ti-TiB-TiC за рахунок армування і одночасної реакції  $B_4C$  з Ti при нагріванні. Механічні характеристики такого матеріалу вищі, аніж в титан-матричного композиту, легованого TiB. Різні методи отримання цього композиту, або подальшої термообробки, дозволяють підвищити ці показники. Такий композит буде мати покращені значення міцності, ударної в'язкості та міцності на згин при підвищеній твердості [4].

**Метою даної роботи** є вивчення закономірностей формування структури титан-матричного композиту Ti-TiB-TiC залежно від кількості добавок карбіду бору у вихідну суміш та методу спікання.

**Виклад основного матеріалу.** В якості вихідного матеріалу застосовували порошок гідриду титана з середнім розміром 7 мкм і порошок карбіду бору з середнім розміром 2 мкм. Для отримання ТМК Ti-TiB-TiC були приготовані суміші порошків  $TiH_2$  з додаванням 2,8, 5,6 та 10,9 об %  $B_4C$ . Формування циліндричних пресовок розміром  $10 \times 10$  мм проводили у сталевій розбірній пресформі. Термообробка пресовок складалася з двох послідовних стадій: дегідровання і спікання. Спікання дегідрованих пресовок

проходило при температурі 1300 °С, з часом витримки 5 хвилин в електронно-променевої установці «ЭЛА-6» та 1 година у вакуумній печі СНВЛ 1.3.1/16М1. Пористість зразків після термообробки визначали методом гідростатичного зважування та кількісного металографічного аналізу. Дослідження мікроструктури отриманих ТМК проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопа РЕМ 106И, укомплектованого енергодисперсійним рентгенівським (EDX) мікроаналізатором для встановлення хімічного (елементного) складу. Для встановлення фазового складу сплавів з різним вмістом бору використовували рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima IV з мідним (Cu K $\alpha$ ) випромінюванням ( $\lambda=0,15418$  нм). Вимірювання твердості спечених пресовок проводили за методом Роквелла.

Зі збільшенням вмісту зміцнюючої фази, загальна пористість матеріалу збільшується, що пов'язано зі зменшенням ефективного коефіцієнта дифузії. Пористість зразків, отриманих при радіаційному і електронно-променевому спіканні, майже однакова і для складів 2,8 і 5,6 об. % В<sub>4</sub>С у вихідній суміші становить 8 і 10 % відповідно, проте при вмісті карбіду бору 10,9 об. % при радіаційному спіканні пористість збільшується до 15,5 % при електронно-променевому лишається на рівні 12 %. Залишкова пористість порошкових титанових сплавів обумовлена як незавершеністю процесів ущільнення при спіканні, так і фазовими й структурними перетвореннями, що призводять до додаткового утворення пор (розпухання) попередньо спресованих пресовок при нагріванні, а також недостатнім часом витримки. За даними металографічних досліджень, спечені зразки являють собою матрицю з титану (т. 1 рис.1) пронизану голкоподібними включеннями бориду титану (т. 2 рис. 1) та дрібними включеннями карбіду титану (т. 3 рис. 1), що підтверджується дифрак-тометричними дослідженнями.

На рисунку 3 зображені мікроструктури зразків, отриманих спіканням суміші гідриду титану та карбіду бору (2,8, 5,6 та 10,9 об. %) у вакуумній печі. Зі збільшенням кількості карбіду бору у вихідній суміші (2,8, 5,6 об. %), збільшується кількість армуючої фази, розміри зерен карбіду і бориду титана майже однакові, проте при збільшенні В<sub>4</sub>С у вихідній суміші спостерігаються залишки непрореагуваного карбіду бору. І при вмістах 10,9 об.% В<sub>4</sub>С їх частка становить порядку 50 %.

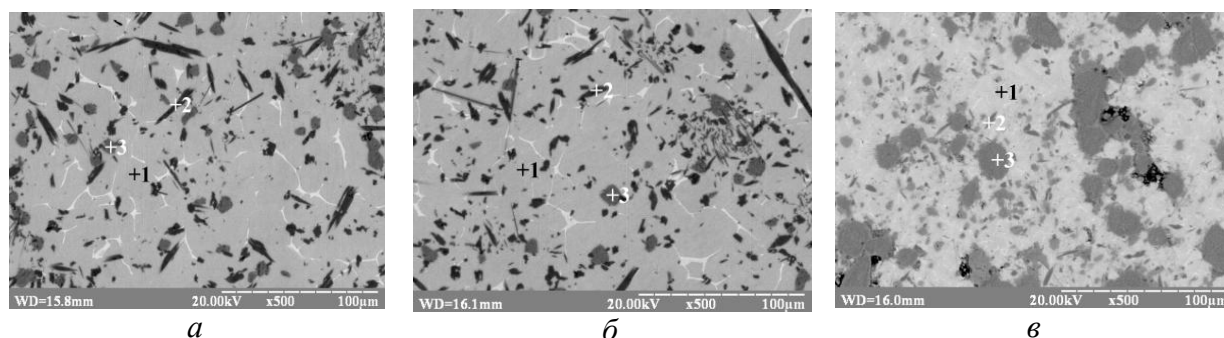


Рис. 1 – Мікроструктури пресовок з суміші TiH<sub>2</sub>+B<sub>4</sub>C після радіаційного спікання:  
а – Ti + 2,8 % B<sub>4</sub>C; б – Ti + 5,6 % B<sub>4</sub>C; в – Ti + 10,9 % B<sub>4</sub>C

На рисунку 2 зображені мікроструктури зразків, отриманих спіканням суміші гідриду титану та карбіду бору (2,8, 5,6 та 10,9 об. %) електронним променем. Структура даного сплаву також являє собою матрицю з титану із голкоподібними включеннями бориду титану та дрібними включеннями карбіду титану. При даному методі спікання реакція між В<sub>4</sub>С та TiH<sub>2</sub> проходить не повною мірою за рахунок малого часу спікання, і на мікроструктурах чітко видно частинки карбіду бору (рис. 2 а, б), які почали дифундувати в об'єм зразка і набули дендритоподібної форми. При вмісті 10,9 об. % карбіду бору у вихідній суміші спостерігається більш повне проходження реакції і утворення дрібнозернистої структури, адже при швидкісному нагріванні та температурах вищих за 1000 °С реалізується реакційна взаємодія, що протікає в режимі самогоріння з виділення великої кількості тепла.

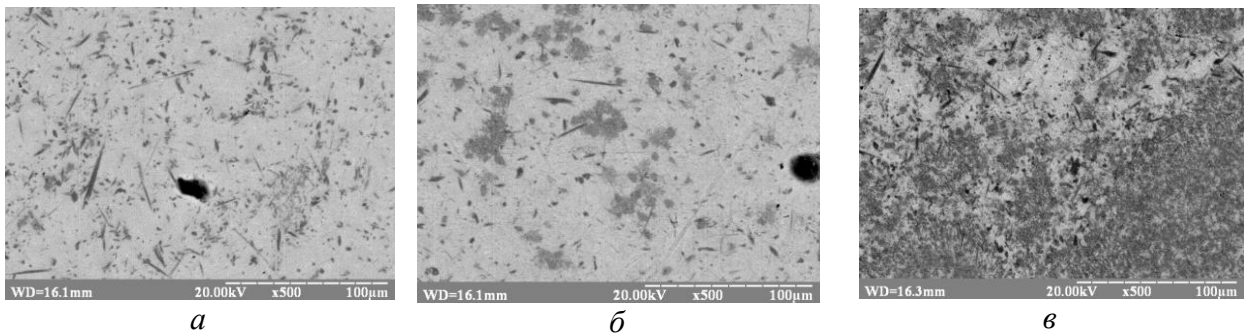


Рис. 2 – Мікроструктури пресовок з суміші  $TiH_2+B_4C$  після електронно-променевого спікання:  
 а –  $Ti + 2,8 \% B_4C$ ; б –  $Ti + 5,6 \% B_4C$ ; в –  $Ti + 10,9 \% B_4C$

Графічні залежності мікротвердості по Віккерсу та твердості по Роквеллу, залежно від вмісту зміцнюючої фази, представлені на рис. 3.

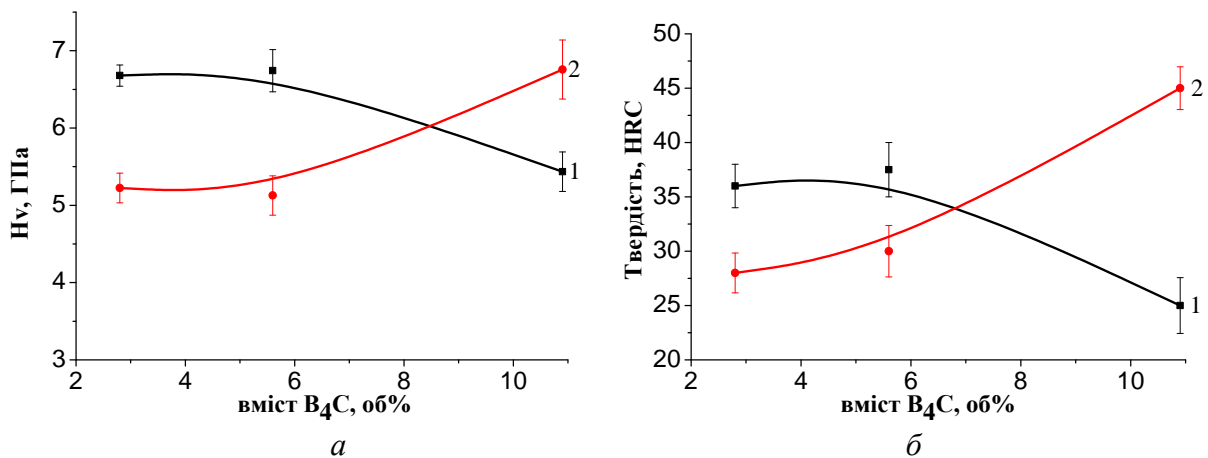


Рис. 3 – Залежність мікротвердості а та твердості по Роквеллу б зразків від вмісту  $B_4C$  у вихідній суміші: 1 – радіаційне спікання; 2 – електронно-променеве спікання

Залежність мікротвердості від вмісту карбіду бору у вихідній суміші, при електропроменевому спіканні має зростаючий характер (рис. 3а). Це пов'язано з тим, що при більшому вмісті  $B_4C$  більша його кількість встигає продифундувати і прореагувати, утворивши більше твердих включень. Для зразків спечених у вакуумній печі,  $B_4C$  в більшій мірі прореагував і утворив фази  $TiB$  і  $TiC$ , але при вмісті 10,9 об. % кількість карбіду бору, який не продифундував, набагато вища ніж при електронно-променевому.

Для оцінки загальної твердості композиту, проводилося дослідження твердості по Роквеллу (рис. 3б) від вмісту зміцнюючої фази. Дані залежності по твердості титан-матричного композиту корелюють із залежностями по мікротвердості, що, в першу чергу, пов'язано зі структурною складовою, а також вищими значеннями пористості зразка з вмістом карбіду бору 10,9 об. % у вихідній суміші при радіаційному спіканні.

**Висновки.** Враховуючи те, що розмір та кількість фазових складових композиту, що формується в результаті дифузійної взаємодії залежить від концентрації вихідних компонентів, температури та часу, встановлено що при швидкісному електронно-променевому спіканні вдалося отримати композит з вищими механічними характеристиками ніж при радіаційному. Відповідно при найбільшому вмісті  $B_4C$  у вихідній суміші при радіаційному спіканні за рахунок уповільнення загального коефіцієнта дифузії отриманий композит характеризується високою пористістю і значною кількістю частинок  $B_4C$ , які не встигли прореагувати, на відміну від електронно-променевого спікання, при якому утворилася дрібнозерниста структура з нижчою пористістю, на формування якої має значний вплив температурний градієнт, величина якого по об'єму пресовки на 100–200 градусів більше, в порівнянні з радіаційним спіканням.

Використання карбіду бору, як легуючого елементу, дає можливість виготовити надлегкий титановий сплав, що може бути цікавим для аерокосмічної промисловості та суднобудування замість деяких промислових сплавів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кислый П. С. Керметы / П. С. Кислый. – К. : Наук. думка, 1985. – 71 с.
2. Кислый П. С. Карбид бора / П. С. Кислый, М. А. Кузенкова, Н. И. Боднарук и др. – К. : Наук. думка, 1988. – 216 с.
3. Karandikar P. G. A review of ceramics for armor applications / P. G. Karandikar, G. Evans, S. Wong et al. // Advanced in Ceramic Armor IV. Ceramic Engineering and Science Proceed84ings. – Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley and Sons, Inc. – 2009. – Vol. 29, No. 6. – 242 p.
4. Abdul Jimoh. In Situ Synthesis of Titanium Matrix Composite (Ti-TiB-TiC) through Sintering of TiH<sub>2</sub>-B<sub>4</sub>C/ Iakovos Sigalas, Mathias Hermann // Materials Sciences and Applications. – 2012. – Vol. 3. –p. 30-35.

#### **Биба Е.Г., Лобода П.И.** ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИТА Ti-TiB-TiC

*Установлено, что формирование титан матричного композита зависит не только от размера и количество фазовых составляющих, формирующихся в результате диффузного взаимодействия, но и от концентрации исходных компонентов, температуры и времени. Методами оптической микроскопии, рентгенофазового и рентгеноструктурного анализов установлено, что полученный композит представляет собой матрицу из титана пронизанную игловидными включениями борида титана и мелкими дендритными включениями карбида титана. Установлено, что при скоростном электронно-лучевом спекании удалось получить композит с высшими механическими характеристиками чем при радиационном. Комплексные исследования закономерностей формирования структуры сплава титан-матричного композита Ti-TiB-TiC, в зависимости от количества добавок карбида бора в исходную смесь и метода спекания, могут быть эффективно использованы для изготовления титановых сплавов взамен промышленных сплавов авиационной техники.*

**Ключевые слова:** гидрид титана, карбид бора, твердость, титан-матричный композит.

#### **Byba Ie.G, Loboda P.I.** THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF COMPOSITE TI-TIB-TIC

*It was established that the formation of titanium matrix composite depends not only on the size and number of phase components formed by diffusion interaction, but also on the concentration of initial components, temperature and time. Using optical microscopy and methods of X-ray diffraction and X-ray analyzes, it was estimated that the resulting composite is titanium matrix pierced with titanium boride needle inclusions and small dendroid inclusions of titanium carbide. It was established that under high-speed electron beam sintering it is possible to obtain a composite with higher mechanical properties than under radiation sintering. Complex investigation of patterns of titanium matrix composite Ti-TiB-TiC structure formation depending on the amount of boron carbide additive to the starting mixture and sintering method can be effectively used for manufacturing titanium alloys in return of some industrial alloys in aviation industry.*

**Keywords:** titanium hydride, boron carbide, hardness, titanium matrix composite.

© Биба Е.Г., Лобода П.И.

Статтю прийнято  
до редакції 7.10.14.

УДК 667.64:678.026

## ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З НАПОВНЮВАЧАМИ РІЗНОЇ ДИСПЕРСНОСТІ ТА ПРИРОДИ

*Букетов А.В., Скирденко В.О., Моїсеєнко Л.Л.*

*Херсонська державна морська академія*

*Аналіз проведених досліджень дозволяє констатувати, що обробка високочастотним електромагнітним імпульсним полем епоксидного олігомеру несуттєво впливає на електричну міцність матриці. Серед досліджуваних композитів з дрібнодисперсними наповнювачами (10...20 мкм) найкращі діелектричні властивості спостерігали для матеріалу з частками карбідної шихти. Серед досліджуваних зразків з наповнювачами дисперсністю 63...120 мкм найвищими значеннями електричної міцності характеризуються матеріали з добавками вугільного шлаку. Проведені дослідження можуть мати широке практичне значення у напрямку застосування епоксикомпозитних покриттів з високими діелектричними характеристиками.*

***Ключові слова:** епоксидний композит, феромагнітні наповнювачі, діелектрики, напруга пробою, електрична міцність.*

**Постановка проблеми.** Розвиток нових технологій у виробництві вимагає розробки перспективних напрямків створення нових композитних матеріалів (КМ) для різних галузей приладобудування, суднобудування, машинобудування, електрорадіопромисловості та будівництва. Відповідно застосування технологічних прийомів формування композитів вимагає наявності об'єктивної науково-практичної інформації стосовно прогнозованого регулювання показників фізико-механічних та електротехнічних характеристик полімерних КМ.

Зокрема, дослідження електричних властивостей полімерних КМ, що мають властивості діелектриків, мають велике значення для електротехнічної та радіоелектронної галузей виробництва. При цьому слід зазначити, що застосування енергетичних методів модифікації структури і властивостей епоксикомпозитів значно розширюють межі їх використання.

Відомо [1], що епоксидні смоли – це велика група матеріалів, для яких характерна наявність макромолекул з полярними епоксидними групами. Виходячи з цього, епоксикомпозити є полярними діелектриками. Найбільш розповсюдженим видом епоксидних смол є діанові олігомери, які отримують шляхом поліконденсації епіхлоргідрину з діокси-дифеніл пропаном у присутності лугів. Усі епоксидні смоли у незатвердженному стані добре розчинні в ацетоні та в інших полярних розчинниках. При додаванні твердника відбувається затвердження макромолекул діанових олігомерів, внаслідок чого отримують тривимірний зшитий полімер. При цьому затвердіння епоксидних олігомерів проводять твердниками за кімнатної температури (холодне зшивання) або за підвищених температур (100...150 °С) (гаряче зшивання). Твердники ангідридного типу застосовують при гарячому зшиванні. Це дає можливість отримувати епоксикомпозитні матеріали з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Як правило, вони відзначаються поліпшеними механічними, електротехнічними властивостями, а з точки зору безпечності – є не такими токсичними, порівняно з КМ, затвердженими амінами при холодному зшиванні.

Епоксикомпозити на основі епоксидної смоли широко застосовують в електро- та радіотехніці як герметизуючі та електроізоляційні матеріали, що мають поліпшену адгезію до металів, кераміки, неорганічного скла. Слід зазначити, що поряд з поліпшеними механічними властивостями, композити на основі епоксидних смол мають також високі показники хімічної та атмосферної стійкості.

Серед основних діелектричних властивостей епоксикомпозитів найважливішими є: поверхнева і питома електропровідність, діелектричні втрати, трекінгостійкість та електрична міцність (електропробій). Електрична міцність – одна з найважливіших характеристик діелектрика, позаяк виникнення пробою може призвести до виходу з ладу

електричного обладнання, виникнення пожежі, займання електроустаткування та інших небажаних наслідків [2].

Явище, при якому матеріал втрачає електроізоляційні властивості, називають пробоем діелектрика. За умови підвищення напруги ізоляції напруженість електричного поля буде перевищувати критичне значення наскрізного струму в діелектрику, внаслідок чого останній миттєво зростає. При цьому опір діелектрика зменшується до значення, яке спричиняє коротке замикання між електродами. Напругу, яка діє в момент пробую, називають пробивною, а напруженість електричного поля – електричною міцністю [3]. Залежно від властивостей ізоляції та потужності джерела електричної енергії, за допомогою якого подають напругу на зразок, після пробую в ізоляції спостерігають наступні перетворення:

- у зоні пробую виникає іскра або електрична дуга (при великій потужності джерела напруги), що зумовлює розтріскування, обгорання та плавлення матеріалу;
- у зоні пробую, як правило, спостерігають його наслідки у вигляді пробитих, проплавлених або пропалених отворів. При повторній подачі напруги пробій зразків спостерігають при значно менших її величинах, порівняно з початковим варіантом.

Зазначене вище вказує на необхідність розробки нових епоксикомпозитних матеріалів, які б за рахунок наявності відповідних наповнювачів забезпечували протидію явищу виникнення пробую в ізоляційному покритті. З іншого боку, навпаки, цікавим з практичного погляду є створення струмопровідного покриття, яке б відзначалося екрануючими властивостями. Це, у свою чергу, дозволить захищати конструкції установок та приладів від руйнування за рахунок своїх провідних властивостей (тобто, у них виникають струми розряду).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поряд з електричним, тепловим і електрохімічним пробоем діелектриків відомі також іонізаційний, електромеханічний та електротермічний складові пробую. Відомо [2], що незалежно жоден із зазначених механізмів пробую на практиці не зустрічається.

Електричний пробій зумовлений руйнуванням діелектрика внаслідок його ударної іонізації електронами і йонами. Як правило, його спостерігають впродовж експозиції зразків в межах часу від  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  с. Тепловий пробій передбачає руйнування зразка за рахунок локального енерговиділення при наявності струму в середовищі діелектрика.

Електротермічний пробій є характерним для крихких діелектриків, що мають порожнини. Він виникає в результаті утворення мікротріщин під дією розрядів у газових включеннях та дислокаціях. Як правило, в таких областях структури діелектриків спостерігають підвищення температури.

Електромеханічний пробій є механічним руйнуванням полімеру при високій нарузі, що передбачає його перехід до високоеластичного стану. У результаті електричного старіння спостерігають зміну структури діелектрика і його хімічного складу. У такому випадку можна стверджувати про електрохімічний пробій полімерного матеріалу. Його, як правило, спостерігають при нарузі, яка значно менша від електричної міцності діелектрика. Електрохімічний пробій спостерігають при експозиції зразка впродовж часу  $10^3 \dots 10^8$  с.

Як зазначено вище, мінімальна прикладена до діелектрика напруга, яка спричиняє утворення в ньому струмопровідного каналу, є напругою пробую. Пробій може бути повним, неповним або частковим. Показано [2], що для твердих діелектриків характерне виникнення поверхневого пробую. У такому випадку руйнується поверхня полімерного матеріалу, утворюючи трекінг.

Залежність пробивної напруги від часу її дії називають «кривою життя» електричної ізоляції. Зниження напруги пробую від часу зумовлено електричним старінням ізоляції, а саме внаслідок дії на діелектрик тепла, світла, ультрафіолетового випромінювання та електричного поля. Електричну міцність, тобто напругу електричного поля при пробі ізоляції в однорідному електричному полі, можна регулювати за рахунок

використання епоксидних композитів з наперед заданими і прогнозованими властивостями.

**Мета роботи** – встановити залежність напруги пробою епоксикомпозитних матеріалів з різними за природою та дисперсністю наповнювачами, а також дослідити вплив обробки феромагнітного наповнювача і композицій вцілому у високочастотному магнітному полі на електричну міцність епоксикомпозитів.

**Матеріали та методика дослідження.** При формуванні КМ як зв'язувач використовували епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Твердник вводили у епоксидний олігомер відповідно до загальноприйнятих рекомендацій [1] за співвідношення: ЕД-20 : ПЕПА – 10 : 1. Як наповнювач використовували дисперсні (63...120 мкм) порошки: сталі (Сталь 45 ГОСТ 1050-88), пермалою (45Н ГОСТ 10994-74) та вугільного шлаку (ВШ), що є продуктом згорання кам'яного вугілля з подрібненням його механічним способом.

Як дрібнодисперсні наповнювачі (10...20 мкм) використовували порошки: колоїдної сірки (КС) (ГОСТ 127.5-93), залізного сурику (ЗС), що складається із суміші мікроелементів і оксиду заліза ( $Fe_2O_3$ ) (ГОСТ 8135-74) та карбідної шихти (КБШ). Карбідна шихта є побічним продуктом при виробництві ацетилену.

Вміст часток у епоксидних композиціях становив – 50 мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20. Обробку високочастотним електромагнітним імпульсним полем (ВЕІП) феромагнітних наповнювачів (Сталь 45 та ЗС) проводили на розробленій установці [4]. Установку налаштовували на такі параметри ВЕІП: напруженість електромагнітного поля –  $H = 1265$  А/м, частота –  $f = 2,25$  МГц, тривалість обробки  $\tau = 900$  с.

Епоксидні композити формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20 і наповнювача, введення часток в епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дисперсних часток; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 300 \pm 10$  с. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год при температурі  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 0,05$  К/с до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання КМ впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год з подальшим їх охолодженням разом з термошафою до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі при температурі  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Електричну міцність отриманих КМ визначали згідно з ГОСТ 6433.3-71. Для цього використовували випробувальний прилад АВД-70/50 (HVTS-70/50) (рис. 1). Випробувальний діодний прилад АВД-70/50 (HVTS-70/50) призначений для випробування ізоляції силових кабелів і твердих діелектриків випрямленою електричною напругою до 70 кВ, а також для випробування твердих діелектриків синусоїдальною електричною напругою до 50 кВ з частотою 50 Гц [5, 6].



Рис. 1 – Зовнішній вигляд діодного приладу АВД-70/50 (HVTS-70/50):  
1 – блок високої напруги; 2 – виносний блок керування

Прилад HVTS-70/50 складається з блока високої напруги (БВН), принципову схему якого наведено на рис. 2. Він забезпечує подачу високої напруги на об'єкт дослідження через клеми X9, X10 і окремого блока керування, який під'єднано до клем X1...X7. Останній здійснює:

- керування блоком високої напруги, а також контроль струму витоку;
- високу точність вимірювання і підтримання випробувальної напруги на заданому рівні;
- корегування струму витоку при роботі із зовнішнім додатковим конденсатором при випробуванні випрямленою напругою;
- вимірювання напруги безпосередньо на навантаженні, що дозволяє отримати реальне уявлення про напругу на об'єкті випробування і контролювати його з високою точністю.

Прилад HVTS-70/50 відзначається можливістю програмування необхідного для проведення конкретного випробування значення максимального струму, а також напруги для спрацьовування схем захисту. Необхідну інформацію про параметри і результати випробувань виведено на графічному дисплеї. Зокрема, у процесі дослідження на дисплеї відображаються значення напруги, струму і таймера часу проведення експерименту. Додатково отримують значення амплітуди напруги, коефіцієнт форми для змінної напруги або коефіцієнт амплітуди для випрямленої напруги.

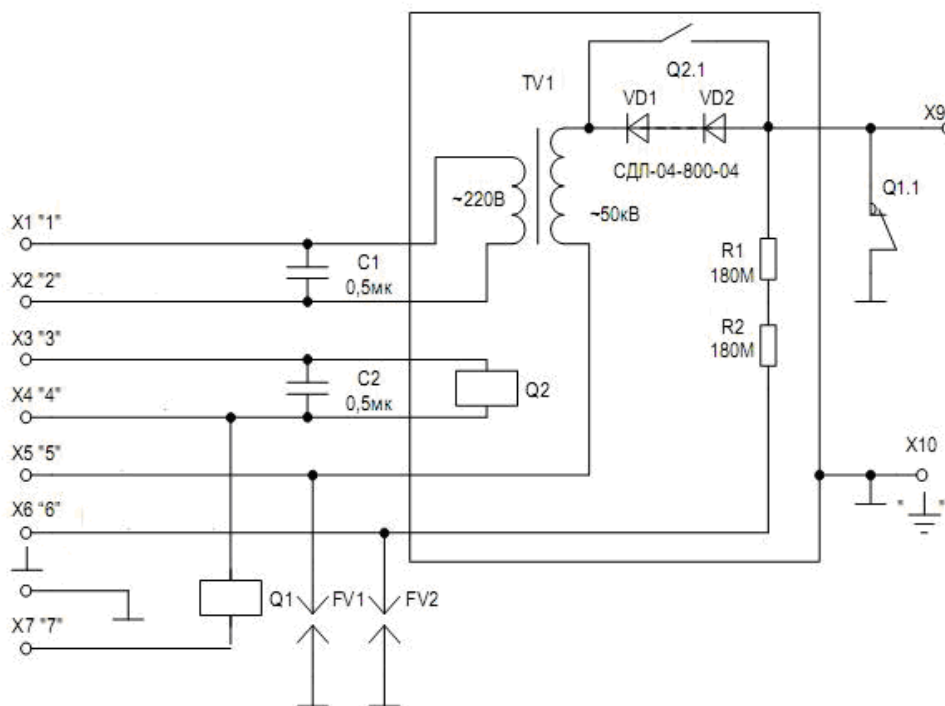


Рис. 2 – Принципова електрична схема блока високої напруги (БВН) приладу АВД-70/50: X1«1», X2«2» – клеми живлення високовольтного трансформатора; X3«3», X4«4», X7«7» – клеми керування реле Q1,Q2; X5«5» – клемма вимірювання струму пробою; X6«6» – клемма вимірювання напруги пробою; X9, X10 – клеми для під'єднання електродів; TV1 – високовольтний трансформатор; Q1,Q2 – керуючі реле; FV1, FV2 – захисні розрядники

Дослідження діелектриків на пробій проводять в однорідному і неоднорідному електричних полях. У газоподібних і рідких діелектриках однорідність поля забезпечують, зазвичай, шляхом формування поверхні електродів певної форми, наприклад, сферичної з радіусом  $R$ , що значно перевищують відстань  $h$  між їх найближчими точками. Крім того, використовують електроди Роговського, форма яких відповідає еквіпотенціальній поверхні і забезпечує однорідність електричного поля в середній частині між електродами. Також однорідне поле в твердих діелектриках можна отримати, піддаючи їх

механічній обробці шляхом видавлювання або висвердлювання в них лунок зі сферичною поверхнею. Така обробка може порушити структуру діелектрика, тому необхідно контролювати якість зразків.

У дослідженні на електропробі використовують такі типи електродів: площина – площина (верхній електрод – торець циліндра у вигляді площини із закругленими краями); сфера великого і малого радіусу – площина; вістря – площина. Для встановлення закономірностей і механізму пробою діелектриків дослідження проводять в однорідному і неоднорідному електричних полях. Для отримання неоднорідного поля використовують електроди типу вістря – вістря або вістря – площина. Значення  $U_{пр}$  в неоднорідному полі є значно меншим, ніж в однорідному, в результаті підвищення середнього значення напруженості поля поблизу електроду з малим радіусом кривизни.

Для проведення дослідження пробою і електричної міцності КМ проводили підготовку експериментальних зразків. Останні формували у вигляді покриття з товщиною  $h = 0,5$  мм, нанесене на мідний субстрат з розмірами  $100 \times 100$  мм. Вимірювання товщини зразків і безпосередньо покриття проводили до проведення досліджень.

Металеві натискні електроди виготовляли з бронзи й міді. Такі циліндричні електроди мають різні діаметри: діаметр нижнього електроду повинен у три рази перевищувати діаметр верхнього електроду. У проведених дослідженнях було застосовано електроди з розмірами: діаметр верхнього електроду  $d = 25$  мм, діаметр нижнього електроду  $d = 75$  мм, радіус закруглення країв електродів  $R = 3$  мм. Питомий тиск електроду на досліджуване покриття, згідно з вимогами стандарту [5], становив  $P = 10$  кПа. Дана умова стосується проведення досліджень з твердими діелектричними матеріалами в широкому діапазоні температур  $\Delta T = 213 \dots 523$  К. На рис. 3 показано світліну, яка ілюструє закріплення досліджуваного зразка між електродами для проведення дослідження електричної міцності КМ.

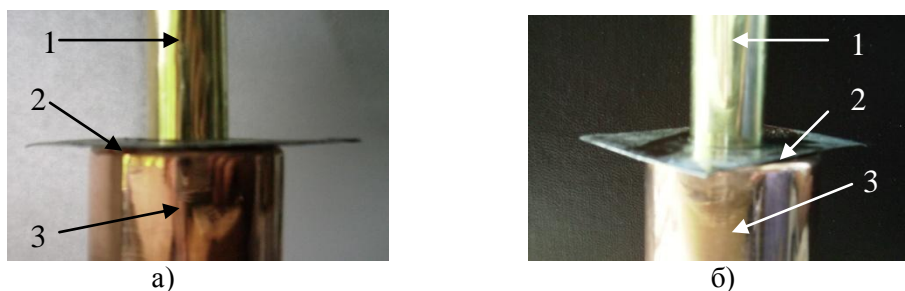


Рис. 3 – Схема закріплення зразка (а) і його розташування між електродами (б) установки під час дослідження: 1 – верхній бронзовий електрод; 2 – досліджуваний зразок з нанесеним покриттям; 3 – нижній мідний електрод

Електричну міцність КМ розраховували за формулою:

$$E_{пр} = U_{пр} / h,$$

де  $E_{пр}$  – електрична міцність, В/м;  $U_{пр}$  – напруга пробою, В;  $h$  – товщина покриття, м.

Досліджувана величина електричної міцності залежить від товщини нанесеного покриття діелектрика, форми та площі електродів, а також від швидкості зростання та часу дії прикладеної напруги. Значення електричної міцності при постійному струмі відрізняється від аналогічного її значення, отриманого при змінному струмі. Тому порівняння характеристик діелектриків і контроль їх якості необхідно проводити за однакових умов експерименту.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Експериментальні дослідження полягали у визначенні електричної міцності епоксикомпозитних матеріалів в результаті прикладання до зразків напруги синусоїдальної форми за частоти струму живлення  $f = 50$  Гц. Позаяк залежність величини електричної міцності від товщини епоксикомпозитних матеріалів є доволі суттєвою, тому порівнювали результати дослідження для зразків однієї товщини.

Слід врахувати, що однією з найважливіших залежностей, яку використовують на практиці, є залежність прикладеної напруги від часу експозиції досліджуваного зразка. Виконання вказаних досліджень передбачає необхідність проведення пошукових експериментів з метою попереднього визначення максимальної напруги пробою при мінімальному часі експозиції (від  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$  с) досліджуваних КМ. Попередньо встановлено, що випробування слід починати за напруги, яка становить 40 % значення максимальної напруги пробою. Надалі значення напруги збільшували до максимальної величини.

Зазначене вище регламентувало проведення досліджень в шести характерних точках, напругу пробою в яких встановлювали на рівні:  $0,4 U_{пр}$ ;  $0,5 U_{пр}$ ;  $0,6 U_{пр}$ ;  $0,7 U_{пр}$ ;  $0,8 U_{пр}$ ;  $1,0 U_{пр}$ . Тривалість експозиції зразків на кожному із зазначених рівнів напруги складала  $t = 20$  с. Якщо впродовж зазначеного часу пробою зразка не спостерігали, тоді проводили дослідження, збільшуючи напругу на 10 %. Збільшували напругу впродовж часу  $t = 1 \dots 2$  с. Якщо впродовж цього часу відбувався пробій, тоді напругою пробою вважали напругу попереднього рівня.

Результати дослідження залежності величини напруги пробою від часу експозиції зразків наведені на рис. 4–6.

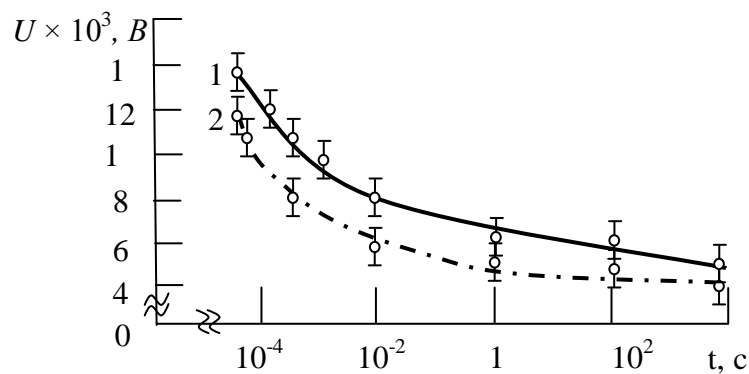


Рис. 4 – Залежність напруги пробою покриттів від часу експозиції зразка (за товщини покриття  $h = 0,5$  мм): 1 – необроблена матриця; 2 – матриця після обробки ВЕІП

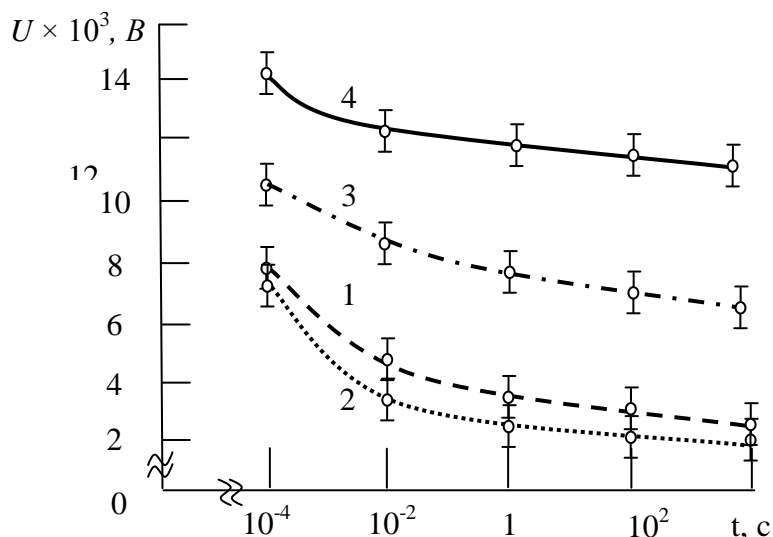


Рис. 5 – Залежність напруги пробою покриттів на основі КМ з дисперсними наповнювачами (10...20 мкм) від часу експозиції зразка (за товщини покриття  $h = 0,5$  мм і вмісту часток  $q = 50$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20): 1 – КМ з частками ЗС; 2 – модифікований ВЕІП КМ з частками ЗС; 3 – КМ з частками КС; 4 – КМ з частками пермалюю КбШ

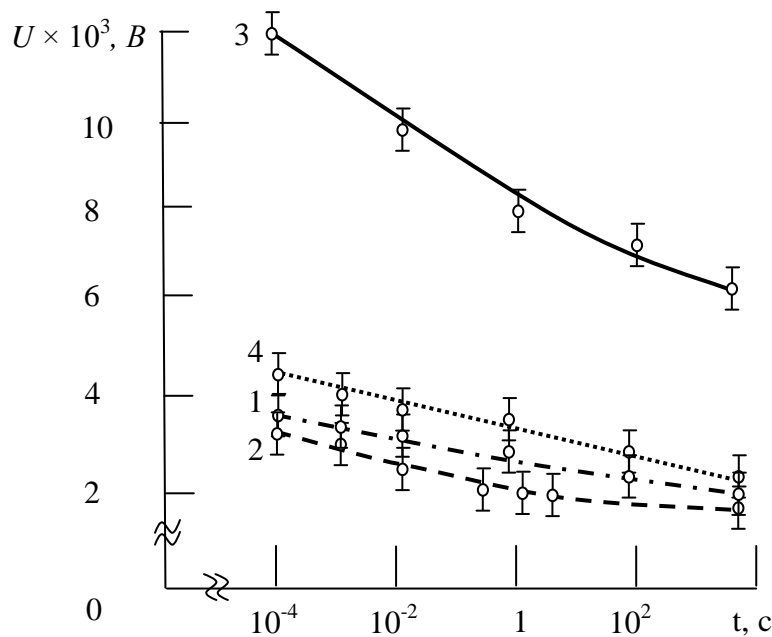


Рис. 6 – Залежність напруги пробою покриттів на основі КМ з дисперсними наповнювачами (63...120 мкм) від часу експозиції зразка (за товщини покриття  $h = 0,5$  мм і вмісту часток  $q = 50$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20): 1 – КМ з частками сталі (Сталь 45); 2 – модифікований ВЕП КМ з частками сталі (Сталь 45); 3 – КМ з частками ВШ; 4 – КМ з частками пермалою 45Н

Аналіз отриманих графічних залежностей вказує на те, що для усіх досліджуваних покриттів з епоксикомпозитних матеріалів спостерігали зменшення величини напруги пробою при збільшенні тривалості витримки зразків у електричному полі високої напруги.

Для порівняння було досліджено електричну міцність вихідної і модифікованої ВЕП епоксидної матриці. Отримані результати дають можливість стверджувати, що обробка ВЕП епоксидного олігомеру суттєво не впливає на електричну міцність матриці. Спостерігали зменшення величини електричної міцності для обробленої композиції, порівняно з вихідною, з  $U = 8,3$  до  $U = 6,1$  кВ/мм за час експозиції зразків  $t = 10^{-2}$  с (рис. 4).

Експериментально встановлено (рис. 5), що серед досліджуваних КМ з дрібно-дисперсними наповнювачами найкращі діелектричні властивості спостерігали для матеріалу з частками КБШ. Такий композит за час експозиції  $t = 10^{-2}$  с відзначався напругою пробою  $U = 12,4$  кВ/мм. Крім того, обробка ВЕП, яку проводили для композицій з феромагнітним наповнювачем залізним суриком (крива 1, крива 2, рис. 5), не приводить до суттєвої зміни показників електричної міцності КМ (зміну значень, залежно від часу експозиції зразків спостерігали в межах 5...8 %).

Доведено (рис. 6), що серед досліджуваних зразків з наповнювачами дисперсністю 63...120 мкм, найвищими значеннями електричної міцності  $U = 10,0$  кВ/мм за час експозиції  $t = 10^{-2}$  с характеризуються матеріали з добавками ВШ. Збільшення часу експозиції таких зразків до  $t = 10^4$  с спричиняє зменшення напруги пробою до  $U = 6,4$  кВ/мм. Додатково встановлено, що обробка ВЕП композицій, зокрема з частками сталі сприяє зменшенню електричної міцності КМ з  $U = 3,6$  кВ/мм до  $U = 2,8$  кВ/мм за часу експозиції  $t = 10^{-2}$  с. Отже можна констатувати, що зниження електричної міцності з часом експозиції зразків доцільно регулювати не магнітною обробкою, а вибором часток наповнювача і шляхом оптимізації його вмісту у діелектричному матеріалі. Сама ж обробка ВЕП епоксикомпозитів з феромагнітними наповнювачами, як і для епоксидної матриці, несуттєво впливає на величину напруги пробою.

**Висновки.** Результати проведених експериментальних досліджень дозволяють констатувати наступне:

1. Обробка ВЕШ епоксидного олігомеру несуттєво впливає на електричну міцність матриці. Спостерігали зменшення величини електричної міцності для обробленої композиції, порівняно з вихідною, з 8,3 до 6,1 кВ/мм за час експозиції зразків  $t = 10^{-2}$  с.

2. Серед досліджуваних КМ з дрібнодисперсними наповнювачами (10...20 мкм) найкращі діелектричні властивості спостерігали для матеріалу з частками КБШ. Такий композит за час експозиції  $t = 10^{-2}$  с відзначався напругою пробою  $U = 12,4$  кВ/мм. Серед досліджуваних зразків з наповнювачами дисперсністю 63...120 мкм найвищими значеннями електричної міцності  $U = 10,0$  кВ/мм за час експозиції  $t = 10^{-2}$  с характеризуються матеріали з добавками ВШ.

3. Проведені дослідження можуть мати широке практичне значення у напрямку застосування епоксикомпозитних покриттів з високими діелектричними характеристиками. Зокрема, епоксикомпозити з дрібнодисперсним наповнювачем карбідною шихтою можна використати для внутрішнього захисного шару електричного обладнання. Покриття з низькими значеннями діелектричної міцності (у нашому випадку це композити з частками сталі) можна використовувати для створення зовнішньої захисної оболонки електричного устаткування.

При проведенні експериментів додатково було з'ясовано, що для більшості досліджуваних епоксидних композитних матеріалів домінуючим є тепловий електропробій. З'ясування впливу температури на величину напруги пробою, а, відповідно, й електричної міцності композитів є необхідним завданням подальших досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стухляк П. Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов, І. Г. Добротвор. – Тернопіль : Збруч, 2008. – 208 с.
2. Материалы микроэлектронной техники / Под ред. В. М. Андреева – М. : Радио и связь, 1989. – 277 с.
3. Тхір І. Г. Фізико-хімія полімерів : навч. посіб. / І. Г. Тхір, Т. В. Гуменецький. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
4. Букетов А. В. Установка для высокочастотного электромагнитного опромінювання / А. В. Букетов, В. О. Скирденко // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО-2012)», (10-12 жовтня 2012 року, м. Херсон). – Херсон : Видавництво ХДМА, 2012. – С. 226-227.
5. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрической прочности при переменном (частоты 50 Гц) и постоянном напряжении: ГОСТ 6433.3-71. – [Дата введения 01.07.71]. – М. : Изд-во стандартов, 1994. – 22 с.
6. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции : ГОСТ 1516.2-97. – [Дата введения 25.04.1997]. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 35 с.

### **Букетов А.В., Скирденко В.А., Моисеенко Л.Л. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ И ПРИРОДЫ**

*Анализ проведенных исследований позволяет констатировать, что обработка высокочастотным импульсным электромагнитным полем эпоксидного олигомера несуттєво влияет на электрическую прочность матрицы. Среди исследуемых композитов с мелкодисперсными наполнителями (10...20 мкм) лучшие диелектрические свойства наблюдали для материала с частицами карбидной шихты. Среди исследуемых образцов с наполнителями дисперсностью 63...120 мкм высокими значениями электрической прочности характеризуются материалы с добавками угольного шлака. Проведенные исследования могут иметь широкое практическое значение в направлении применения епоксикомпозитных покрытий с высокими диелектрическими характеристиками.*

**Ключевые слова:** *эпоксидный композит, ферромагнитные наполнители, диэлектрики, напряжение пробоя, электрическая прочность.*

**Buketov A.V., Skirdenko V.O., Moiseenko L.L.** ELECTRIC STRENGTH OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS WITH FILLERS OF DIFFERENT GRANULARITY AND NATURE

*Analysis of the conducted research allows to state that the processing of epoxy oligomer with high-frequency pulsed electromagnetic field does not significantly affect the electrical strength of the matrix. Among the investigated composites with fine fillers (10...20 micron) the best dielectric properties were observed for the material with particles of carbide mixture. Among the samples with fillers having dispersion of 63...120-micron materials with additives of coal slag have high values of electric strength. The conducted research can have practical value in applying epoxy composite coatings with high dielectric characteristics.*

**Keywords:** *epoxy composite, ferromagnetic fillers, dielectrics, breakdown voltage, dielectric strength.*

© Букетов А.В., Скирденко В.О., Моїсеєнко Л.Л.

Статтю прийнято  
до редакції 27.10.14

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ОПЕРАЦИИ ВНЕШНЕЙ БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

*Гнатюк А.В.*

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

*В статье определен технологический маршрут операции внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. Представлена условная классификация вмятин, которые могут быть удалены методами внешней магнитно-импульсной рихтовки. Проведен анализ альтернативных, по отношению к магнитно-импульсному методов удаления вмятин с листовых металлов. Обозначены основные преимущества магнитно-импульсных методов.*

**Ключевые слова:** *внешняя рихтовка, удаление вмятин, кузовной ремонт, магнитно-импульсная обработка металлов, кузовная панель.*

**Введение.** Ремонтные и восстановительные работы корпусных и кузовных элементов транспортных средств являются все более востребованными, что предъявляет все более высокие (жесткие) требования к оборудованию, которое обеспечивает выполнение данного вида работ. Особенно актуально это для методов и средств рихтовки и восстановления кузовных панелей автомобилей [1]. Как показывают статистические данные, до 80 % повреждений кузовных элементов автомобилей приходится на небольшие и средние повреждения. Половина из них – это вмятины, не требующие замены всего элемента и устраняемые рихтовкой. Более 50 % таких повреждений составляют зоны с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. В этой связи особый интерес представляют методы восстановления кузовов автомобилей, позволяющие произвести так называемую внешнюю рихтовку без разборки кузовных элементов и нарушения существующего защитного покрытия [1, 2].

На данный момент существует несколько технологий ремонта и восстановления кузовных панелей автомобилей без их разборки и демонтажа, но наиболее перспективным из них, всё же являются магнитно-импульсные технологии ремонта [3–6].

**Анализ основных достижений и публикаций.** Следует отметить и наличие иных, альтернативных по отношению к магнитно-импульсному методов удаления вмятин с листовых металлов. Так, фирмой Beulentechnik AG [6] предложены механические способы внешней рихтовки вмятин в автомобильных кузовах. Однако их практическое осуществление требует очень высокой квалификации исполнителя и не обладает достаточной надёжностью с точки зрения сохранности ремонтируемого элемента. Американскими инженерами предложен целый ряд технических способов удаления вмятин с металлических конструкций. Например, в патентах [7, 8] описан способ удаления вмятин с помощью магнита (электромагнита). Суть данного способа заключается в том, что к месту с вмятиной на металле подносят магнит (электромагнит), а с противоположной стороны, то есть с обратной стороны поврежденного участка листового металла, подносят металлический объект (шарик, ролик, массивную металлическую подложку) который обладает хорошими магнитными свойствами. Магнит, притягивая металлический объект, удаляет вмятину. В патенте [9] предложен комплекс по удалению вмятин с кузовов автомобилей, в основу которого положено совмещение гидравлики с электромагнитом. В патенте [10] описан пневматический способ и оборудование для удаления вмятин с кузовов автомобилей. Вакуумный способ удаления вмятин описан в патенте [11]. В монографии [12] описывается способ удаления вмятин с помощью интенсивного нагрева и последующим резким охлаждением участка, где находится вмятина. Авторы монографии [13] описывают способ прямого пропускания тока через обрабатываемый металл, принцип действия которого основан на взаимодействии параллельных проводников с токами (закон Ампера). В результате проводники с одинаково направленными токами притягиваются друг к другу, что и лежит в основе устранения деформаций. Общим недостатком перечисленных методов является

то, что защитное лакокрасочное покрытие кузовной панели в процессе такой рихтовки повреждается. Также большая часть из перечисленных методов предполагает доступ к поврежденному участку кузовной панели с противоположной стороны, т.е. требует разборку и демонтаж кузовных элементов.

**Актуальность исследований.** Фактически внедрение магнитно-импульсных технологий в ремонт и восстановление корпусных и кузовных элементов транспортных средств, привело к появлению совершенно нового направления, которое можно сформулировать, как развитие методов восстановления кузовов и корпусов транспортных средств, основанных на использовании энергии импульсных электромагнитных полей [14, 15].

Данные методы обладают рядом преимуществ:

- экологическая чистота и ресурсосбережение;
- отсутствие механического контакта с объектом обработки;
- низкая себестоимость оборудования (в сравнении с существующими аналогами);
- возможность удаления вмятин с кузовных панелей автомобилей без их разборки и демонтажа;
- возможность сохранения защитного лакокрасочного покрытия;
- управляемость процессом рихтовки;
- универсальность – возможность использования для других технологических операций (обжим, раздача, штамповка, формовка, и т.п.);
- быстрота и оперативность выполнения ремонтных и восстановительных операций.

Следует отметить, что при работе с металлом традиционными механическими методами (рихтовке, выдавливании, скручивании и т.п.), металл становится тонким и растягивается. При этом особой деформации подвергается верхний слой металла, что приводит к нарушению самой его структуры. Магнитно-импульсные методы рихтовки лишены перечисленных недостатков, т.к., взаимодействие магнитного поля с индуцированным током (наведенным по всей толщине обрабатываемого металла) приводит к удалению вмятин в металле возбуждаемыми силами притяжения. Данные силы действуют равномерно по всей толщине металла [2, 3, 12 – 14, 16].

**Цель работы.** Определение технологического маршрута операции внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. Классификация вмятин, которые могут быть удалены методами внешней магнитно-импульсной рихтовки.

**Технологический маршрут операции рихтовки.** Работа комплекса внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки кузовов автотранспортных средств можно проиллюстрировать схемой, представленной на рис. 1. [14, 15]. Энергетический блок (источник мощности) работающий от сети ~ 380/220 В. Управление работой комплекса осуществляется приборами контроля и управления (система управления). Инструмент, посредством которого оператор выполняет восстановление поврежденной металлической поверхности, соединен с энергетическим блоком гибким кабелем.

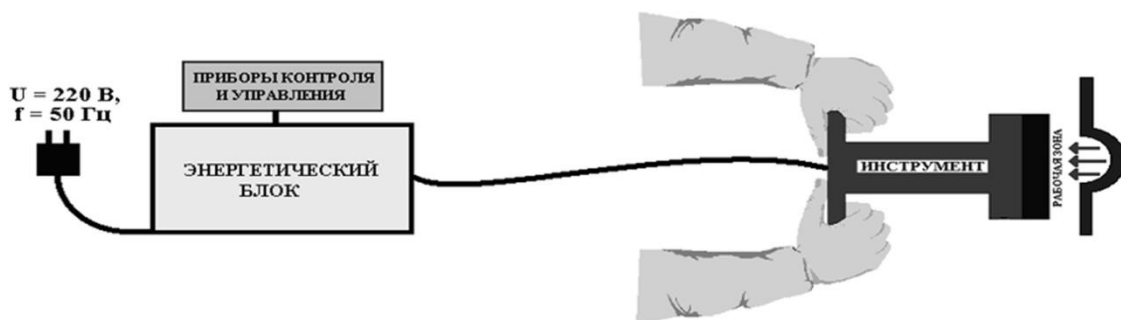


Рис. 1 – Схема, иллюстрирующая работу комплекса внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки

Отработка технологического маршрута проводилась на экспериментальном комплексе для внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки, созданном на базе магнитно-импульсной установки МИУС-2, разработанной в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ (рис. 2) [14, 15, 17–20].



Рис. 2 – Экспериментальный комплекс внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки

Технологический маршрут внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки можно осветить фотоиллюстрациями (рис. 3) проведенных экспериментальных исследований, которые отражены в публикациях [2, 14, 17, 21] и на сайте «Лаборатория электромагнитных технологий» ХНАДУ [15].



Рис. 3 – Иллюстрация технологического маршрута внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки

*Технологический маршрут внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.*

1. Производится внешний осмотр поверхности элементов кузова автомобиля на предмет оценки повреждений, как объектов, подлежащих устранению. Геометрические размеры и характер выявленных вмятин определяет уровень и интенсивность необходимого силового воздействия.

2. Определяются границы вмятины и её геометрия, что фиксируется легко стираемым маркером (рис. 3, слева).

3. С внешней стороны кузовной панели автомобиля с вмятиной (непосредственно над ней) размещается специальная диэлектрическая накладка, назначение которой – жесткая фиксация рабочей зоны инструмента магнитно-импульсной рихтовки по отношению к внешним границам вмятины, подлежащей устранению.

4. Выбирается необходимый уровень энергии, который устанавливается оператором на пульте управления.

5. Выбирается необходимое количество разрядных импульсов силового воздействия.

6. Оператор фиксирует инструмент внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки над областью вмятины на кузове автомобиля (рис. 3, центр).

7. Оператор приводит систему в действие, производится внешняя бесконтактная магнитно-импульсная рихтовка элемента кузовной панели автомобиля.

8. Возбуждаемые силы притягивают металл кузовной панели автомобиля в области рабочей зоны инструмента до первоначального уровня ровной поверхности.

9. После проведения операции рихтовки инструмент и диэлектрическая накладка убираются, стираются нанесенные маркером обозначения (рис. 3, справа)

10. При необходимости проводится коррекция (доводка) кузовной панели.

При необходимости технологические операции внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки осуществляют несколько раз до полного восстановления поврежденной поверхности. При устранении вмятин с большими геометрическими размерами применяется комплексный технологический подход.

Если устраняются несколько вмятин, для каждой из них технологический маршрут рихтовки осуществляется отдельно, согласно выше представленному алгоритму.

**Классификатор вмятин.** Основным преимуществом рассматриваемого магнитно-импульсного метода рихтовки является то, что ремонтная операция производится с внешней стороны поврежденной кузовной панели автомобиля без её разборки и демонтажа. Сам же процесс ремонта длится от нескольких секунд до нескольких минут, в зависимости от формы вмятины, её расположения и геометрических разметов. Ход операции и её технологический маршрут определяется, собственно, параметрами вмятины на кузовной панели. Последнее обстоятельство требует задаться условной классификацией рихтуемых вмятин.

Данная классификация обозначит область применения магнитно-импульсного метода рихтовки кузовных панелей автомобилей.

Накопленный опыт экспериментальных исследований и практической апробации инструментов для внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки, позволяет выделить три основных вида вмятин, которые могут быть удалены разработанным в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ оборудованием [15]. Для определения вида вмятины вводится коэффициент глубины вмятины  $k$  [20]:

$$k = \frac{z}{D}, \quad (1)$$

где  $z$  – глубина вмятины (деформации), м;  $D$  – диаметр вмятины, м.

В соответствии с выражением (1) можно выделить следующие виды вмятин (рис. 4) [20]:

- упругие деформации – предел текучести металла [22] не преодолен,  $k < 0,025$ ;
- пластичные деформации – металл находится в зоне между пределом текучести и пределом прочности, при этом защитное лакокрасочное покрытие остается неповрежденным,  $0,025 \leq k \leq 0,03$ ;
- промежуточное положение деформации – металл находится в точке предела текучести,  $k > 0,03$ .

Приведенная классификация вмятин носит локальный характер в рамках рассматриваемого метода рихтовки. Следует отметить, что разные марки сталей имеют различные значения предела текучести [22], и превышение точки предела текучести приводит к нарушению защитного покрытия на металле. Рассматриваемый метод внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки позволяет устранять (с допустимой точностью) и такие деформации, в которых металл прошел точку предела текучести, но в таких случаях речь о сохранности лакокрасочного покрытия уже не идет.

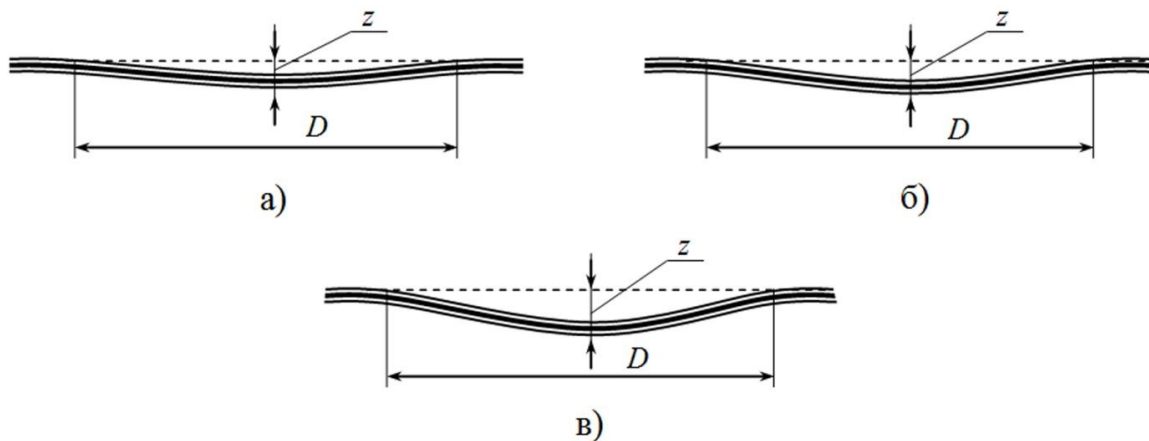


Рис. 4 – Виды вмятин; а) вмятина при  $k < 0,025$ ; б) вмятина при  $0,025 \leq k \leq 0,03$ ; в) вмятина при  $k > 0,03$

В соответствии с приведенной классификацией вмятин и выбирается технологический маршрут операции рихтовки. Т.е. оператор определяет как уровень запасаемой энергии, так и количество разрядных импульсов. Данные параметры выбираются, исходя из статистического опыта при эксплуатации конкретного оборудования.

Необходимо отметить, что удаление вмятин с небольшой пластической деформацией происходит в следствии:

- многократной импульсной нагрузки металла, что способствует релаксацию остаточных деформаций и снятию механического напряжения металла.
- действия эффекта гиперпластичности (деформация металла без нарушения его структуры и свойств) [23].

В результате выполненных исследований проведена успешная практическая апробация оборудования внешней магнитно-импульсной рихтовки на различных марках сталей кузовных панелей автомобилей толщиной 0,6...1,2 мм, с радиальными геометрическими размерами удаляемых вмятин до 50 мм с глубиной вмятины до 2 мм [15].

**Выводы.** Проведенные исследования в рамках настоящей работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Определен технологический маршрут операции внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.
2. Представлена классификация вмятин, которые могут быть удалены методами внешней магнитно-импульсной рихтовки.
3. Представлен анализ альтернативных, по отношению к магнитно-импульсному, методов удаления вмятин с листовых металлов. Обозначены основные преимущества магнитно-импульсных методов.
4. Рассматриваемый магнитно-импульсный метод рихтовки кузовных панелей автомобилей позволяет удалять вмятины с поперечными размерами до 50 мм с глубиной до 2 мм. Вмятины больших размеров требуют комплексный технологический подход.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсные технологии для восстановления корпусных элементов транспортных средств. Часть 1 Актуальность и перспективность направления МИОМ. Пути решения / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, И. С. Трунова // Науковий вісник ХДМА. – Херсон : ХДМА. –2013. – № 1 (8). – С. 104–111.
2. Новая современная технология внешней бесконтактной рихтовки автомобилей : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції [«Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту»], (Вінниця, 21–23 жовтня, 2013 р.) / А. В. Гнатов – Вінниця : ВНТУ, 2013. – С. 39–41.

3. Гнатов А. В. Анализ электродинамических процессов в цилиндрических индукторных системах – инструментах магнитно-импульсной рихтовки : монографія / А. В. Гнатов. – Харьков : ХНАДУ, 2013 – 292 с.
4. Кузовной ремонт легковых автомобилей: [производственно-практическое издание]. – Минск : Автостиль, 2003. – 272 с.
5. Кузовные работы : [пособие по самостоятельному ремонту. Цветные фотографии]. – Днепропетровск : Монолит, 2011. – 164 с.
6. Welcome to BETAG Innovation [Электронный ресурс] – 2014. – Режим доступа: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com).
7. Пат. 7,124,617 B2 USA (США), B21J 15/24 B21D 5/00. Magnetic dent removal device, method and kit / Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe; заявитель и патентообладатель Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe, Hickory, Arlington HeightP. – № 10/341,611 ; заявл. 14.01.2003; опубл. 24.10.2006.
8. Пат. 7,143,627 B2 USA (США), B21J 15/24. Apparatus and method for removing dents from metal / James M. Akins; заявитель и патентообладатель James M. Akins, Dublin. – № 11/138,057 ; заявл. 26.05.2005; опубл. 05.12.2006.
9. Пат. 4,252,008 USA (США), B21D 26/14. Apparatus for removing dents from automobile bodies and the like / William L. Dibbens; заявитель и патентообладатель William L. DibbenP. – № 12/648 ; заявл. 16.02.1979; опубл. 24.02.1981.
10. Пат. 6,014,885 USA (США), B21D 1/06. Dent removal apparatus and method of operation / Gerald J. Griffaton; заявитель и патентообладатель Gerald J. Griffaton, Berwyn. – № 08/958,424 ; заявл. 27.10.1997; опубл. 18.01.2000.
11. Пат. 6,538,250 B1 USA (США), B21D 1/12. Apparatus and method for vacuum dent repair / Borchert Donald Paul; заявитель и патентообладатель Dent Defyer Inc. – № 09/707,562 ; заявл. 06.11.2000; опубл. 25.03.2003.
12. Гнатов А. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монографія / А. В. Гнатов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин. – Lap Lambert Academic Publishing, 2012. – 242 с.
13. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями : монографія / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 240 с.
14. Гнатов А. В. Научные основы восстановления кузовных панелей автомобилей методами внешней бесконтактной рихтовки: дисс. ... доктора техн. наук : 05.22.20 / Андрей Викторович Гнатов. – Харьков, 2014. – 391 с.
15. Лаборатория электромагнитных технологий // Материалы сайта – 2014. – Режим доступа : <http://electromagnetic.comoj.com>.
16. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2013. – № 213 (3). – P. 444-452.
17. Гнатов А. В. Внешняя бесконтактная рихтовка кузовных панелей автомобилей / А. В. Гнатов // Вісник СевНТУ. Серія : Машиноприладобудування та транспорт : зб. наук праць. – Севастополь, 2013.– Вип. 142. – С. 61-64.
18. Пат. 73733 України, B21 D 26/14. Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Чаплигін Є. О., Дзюбенко О. А., Дробінін О. М ; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 02178 ; заявл. 24.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.
19. Пат. 61417 Україна, B21 D 26/14. Генератор багатократних імпульсів струму для обробки металів тиском імпульсного магнітного поля / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Гнатова Щ. В., Трунова І. С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2010 13096 ; заявл. 04.11.2010; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.

20. Пат. 61088 України, В21 Д 26/14. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів з розгалуженим колом комутуючих пристроїв / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Воробйов В. В. ; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2010 12932 ; заявл. 01.11.2010; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.

21. Бесконтактные магнитно-импульсные технологии для рихтовки кузовов транспортных средств : материалы пятой международной научно-практической конференции [«Проблемы и перспективы развития Евроазиатских транспортных систем»], (Челябинск, 17-18 мая, 2013 г.) / А. В. Гнатов, И. С. Трунова, Щ. В. Аргун, С. А. Шиндерук // ред. О. М. Ларина, Ю. В. Рождественский – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ – 2013. –С. 71-75.

22. Бобылев А. В. Механические и технологические свойства металлов. Справочник / А. В. Бобылев. – М. : Металлургия, 1980. –296 с

23. Daehn G. P. Hyperplastic Forming: Process Potential and Factors Affecting Formability / G. P. Daehn, V. J. Vohnout, P. Datta // Superplasticity and Superplastic Forming; [Editors P. V. Verbon, M. Z. Verbon, T. Sakuma, T. G. Langdon]. – Volume 601. – 2000. – P. 247-253.

**Гнатов А.В. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ МАРШРУТ ОПЕРАЦІЇ ЗОВНІШНЬОГО БЕЗКОНТАКТНОГО МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ**

*У статті визначено технологічний маршрут операції зовнішнього безконтактного магнітно-імпульсного рихтування. Представлена умовна класифікація вм'ятин, які можуть бути видалені методами зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування. Представлено аналіз альтернативних по відношенню до магнітно-імпульсних методів видалення вм'ятин з листових металів. Позначені основні переваги магнітно-імпульсних методів.*

**Ключові слова:** зовнішнє рихтування, видалення вм'ятин, кузовний ремонт, магнітно-імпульсна обробка металів, кузовна панель.

**Hnatov A.V. TECHNOLOGICAL ROUTE FOR OPERATION OF EXTERNAL NON-CONTACT MAGNETIC-PULSE STRAIGHTENING**

*The technological route for operation of external non-contact magnetic pulse straightening was defined in the article. The conventional classification of dents that can be removed by external magnetic-pulse straightening methods was presented. The analysis of alternatives in relation to the magnetic-pulse methods for dents elimination from sheet metal was carried out. The main advantages of magnetic-pulse methods were represented.*

**Keywords:** external straightening, dents elimination, body repair, magnetic-pulse metal working, body panel.

© Гнатов А.В.

Статтю прийнято  
до редакції 22.10.14

УДК 669.788

## ВПЛИВ ДОМІШОК ВТІЛЕННЯ ( $H_2, C$ ) НА ПРОЦЕСИ МАГНІТНОГО І АТОМНОГО ВПОРЯДКУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНВАРНОГО СПЛАВУ Н36

*Наговська І.В., Федоров В.В.*

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів,*

*Прокоп'юк В.А., Бачинський Ю.Г.*

*Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка, м. Тернопіль*

*Досліджено вплив водню на параметри магнітного та атомного впорядкування у легуваному вуглецем (до 0,3 мас. %) сплаві Н36. Встановлено, що легування вуглецем (0,26 мас. %) призводить до зростання температури точки Кюрі  $T_C$  на 30 К, яка за наводнювання зменшується на 8...10 К. Показано, що розчинений водень збільшує ступінь дальнього атомного порядку структури FeNi на 25 % за незмінності температури точки Курнакова  $T_K$ . При цьому присутність атомів водню інтенсифікує дифузійну рухливість атомів вуглецю і за його вмісту 0,17 мас. % вони впорядковуються по міжвузлях кристалічної ґратки. За цієї концентрації встановлена максимальна температура (500 К) існування мінімального значення ТКЛР  $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  у сплаві Н36. Показано, що поєднання легування вуглецем та термообробки у водні на атомне впорядкування дозволяє покращити міцнісні властивості сплаву Н36 – при 293 К  $\sigma_s$  зростає на 40 %.*

*Ключові слова:* водень, вуглець, інвар, магнітне і атомне впорядкування, електроопір.

**Постановка проблеми і мета роботи.** Застосування водню як технологічного середовища у процесі обробки функціональних матеріалів на основі d–перехідних металів ґрунтується на закономірностях його впливу на існуючі в них магнітні і поліморфні перетворення та процеси атомного впорядкування [1–3]. Одночасно ці процеси проявляються у сплавах системи Fe–Ni, які завдяки цьому володіють низкою цінних фізичних властивостей, що дозволяє вибрати їх як модельний об'єкт досліджень. Такий вибір дає можливість вивчити вплив водню на атомне впорядкування і на вузлах, і у міжвузлях кристалічної ґратки, а також встановити взаємозв'язок між атомним і магнітним впорядкуванням. Особливий інтерес дослідників викликають залізонікелеві сплави інварної області концентрацій (30...45 % Ni), які характеризуються теплофізичною аномалією – низьким значенням температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) в інтервалі 73...373 К [4]. Ця аномалія пояснюється тим, що в області існування феромагнетизму теплове стискування кристалічної ґратки під час охолодження компенсується її розширенням внаслідок виникнення у сплаві спонтанної магніострикції. Іншою важливою характеристикою таких сплавів є «інварне зміцнення» – різке зростання межі міцності після фазового переходу парамагнетик – феромагнетик. Обидві ці аномалії суттєво залежать від умов термічної обробки і вмісту домішок втілення, зокрема вуглецю. В першому випадку необхідно враховувати можливість утворення впорядкованих атомних структур, які впливають на температурний інтервал існування феромагнетизму, в другому – домішки втілення викликають зміну магнітних характеристик [1]. Отже, комбінуючи відповідну термообробку у водні з процентним вмістом вуглецю, можна покращити експлуатаційні характеристики інварних сплавів.

Відомо [5], що обов'язковою умовою існування феромагнетизму в металах є наявність обмінної електронної взаємодії, позитивний знак якої досягається лише в певних інтервалах температур і значень параметра ґратки. Змінюючи їх величину шляхом легування або термообробки, можна впливати на спонтанну намагніченість сплавів і розширити температурні межі застосування інвару як матеріалу з мінімальним ТКЛР. За критерій оцінки зміни магнітних властивостей вибрали температуру точки Кюрі  $T_C$ , в якій ефективна обмінна енергія рівна тепловій енергії, що надається зразкам при нагріванні. Кінетику атомного впорядкування оцінювали за зміною температури Курнакова  $T_K$  та ступеня дальнього атомного порядку. Об'єктом дослідження вибрали інварний сплав Н36 (Fe – осн., Ni – 35,7, Mn – 0,50, Si – 0,26, C – 0,01, S – 0,005, P – 0,001).

**Мета роботи** – визначити закономірності та фізичний механізм впливу водню і вуглецю на параметри магнітного і атомного впорядкування, ТКЛР та «інварне зміцнення» у сплаві НЗ6, враховуючи взаємовплив втілених атомів водню і вуглецю.

**Методики проведення експериментів.** Досліджуваний сплав НЗ6 виплавляли у високочастотній індукційній печі і насичували вуглецем (до 0,3 мас.%), добавляючи у тигель графіт з наступною розливкою металу. Перед вимірюваннями зразки після 30 хв. відпалу при 1173 К загартовували у воді.

Процеси магнітного та атомного впорядкування вивчали методом електропровідності на змінному струмі з використанням автоматичного компенсатора [6], який дозволяє отримувати неперервні залежності зміни електроопору від температури в широкому діапазоні частот вимірювального струму (до 200 кГц). Вибір цього методу зумовлений тим, що електроопір зразків на змінному струмі 50 Гц може служити індикатором формування впорядкованих атомних структур [7], а для дослідження параметрів феромагнітного перетворення вивчали аномалію (максимум) електроопору, яка з'являється в околі температури точки Кюрі за вимірюванні на змінному струмі звукового діапазону частот (5...25 кГц) [8].

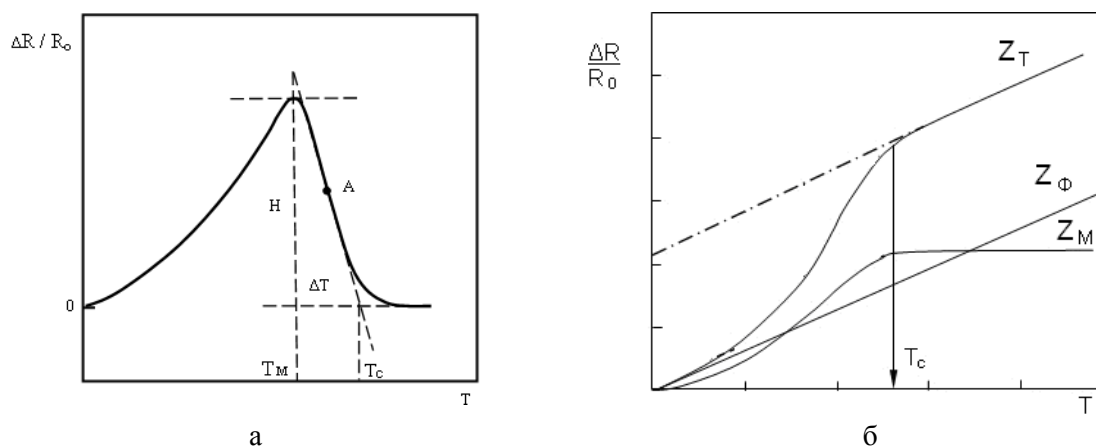


Рис. 1 – Структурно-чутливі параметри аномалії електроопору феромагнетиків змінному струму частотою 15 кГц [8] (а) і розділення повного електроопору феромагнетиків  $Z_T$  на фононну  $Z_\phi$  і магнітну  $Z_M$  складові [9] (б)

Для інтерпретації отриманих результатів використовували наступні параметри аномалії (рис. 1а):

- висота максимуму електроопору  $H$ , яка є різницею його значень у початковій та кінцевій точках феромагнітного перетворення і пропорційна поверхневій магнітній проникливості матеріалу;
- температура феромагнітного перетворення  $T_C$ , яку визначали як точку перетину дотичної, проведеної на ділянці найбільш різкого спаду електроопору, і екстрапольованої з парамагнітної області залежності  $\Delta R / R_0$ ;
- різниця температур  $\Delta T$  максимуму аномалії  $T_M$  і точки Кюрі  $T_C$ , що характеризує структурну однорідність досліджуваного матеріалу (збіг цих температур відповідав би монокристалу).

Для дослідження впливу водню на дифузійну рухливість атомів вуглецю у сплаві НЗ6 проводили розділення температурних залежностей повного електроопору  $\rho_T$  на фононну  $\rho_\phi$  та магнітну складові  $\rho_M$  за наступною методикою [9]. Згідно правила Маттіссена, повний електроопір можна записати у вигляді суми:

$$\rho_m = \rho_0 + \rho_\phi + \rho_m, \quad (1)$$

тут  $\rho_0$  – залишковий опір, зумовлений розсіянням електронів провідності на домішках, який можна знайти екстраполяцією температурної залежності  $\rho_T$  до  $T = 0$  К.

Фононна частка електроопору  $\rho_{\phi}$  зумовлена тепловим рухом атомів і з великою точністю за температур менших точки Кюрі  $T_C$  описується інтерполяційною формулою Грюнайзена:

$$\rho_{\phi} = A(T/\Theta)^5 \cdot \int_0^{\Theta/T} y^5 (e^y - 1)^{-1} (1 - e^{-y})^{-1} dy, \quad (2)$$

де  $\Theta$  – температура Дебая,  $A$  – постійна для даного металу.

Оскільки за температур вище точки Кюрі магнітна складова електроопору не залежить від температури, а формула (2) скорочується до  $AT/4\Theta$ , то повний високотемпературний електроопір феромагнетиків запишеться у вигляді:

$$\rho_m = \rho_0 + \rho_m + AT/4\Theta, \quad (3)$$

де  $\rho_0$  і  $\rho_m$  постійні.

Це дозволяє за кутовим коефіцієнтом  $d\rho/dT$  при високих температурах з рівняння прямої (3) розрахувати  $A/4\Theta$ , а за низькотемпературним електроопором визначити  $\rho_0$ . Таким чином, графічно віднявши суму фононного і залишкового опорів як функцію температури від повного електроопору, можна отримати температурну залежність зміни його магнітної складової. На рис. 1б показаний типовий приклад розділення температурної залежності повного електроопору феромагнетика на фононну  $Z_{\phi}$  і магнітну  $Z_M$  складові ( $Z = \Delta R / R_0$ ).

Вимірювання електроопору проводили в інтервалі температур 293...573 К у вакуумі ( $10^3$  Па) і водні (0,1 МПа). Зміну параметра кристалічної ґратки після науглечування сплаву НЗ6 визначали на рентгенівській установці ДРОН 3М (FeK $_{\alpha}$  – випромінювання), а ТКЛР вимірювали високотемпературним дилатометром. Вплив домішок втілення на міцнісні властивості досліджували на установці ИМАШ (20–75), згідно методики, описаної в [10].

**Вплив водню та вуглецю на параметри магнітного впорядкування сплаву НЗ6.** Отримані температурні залежності відносної зміни електроопору зразків з різним вмістом вуглецю характеризуються гістерезисом під час нагріву і охолодження (рис. 2а). Визначені на їх основі температури Кюрі наведені в табл.1 і однозначно вказують на ріст температури феромагнітного перетворення зі збільшенням вмісту вуглецю у сплаві, що є наслідком зростання ефективної обмінної взаємодії. З ростом концентрації вуглецю ефект від впливу водню, який полягає у зменшенні температури Кюрі [1], посилюється, що можна пояснити антиферомагнітною взаємодією розчинених атомів водню з атомами компонентів сплаву.

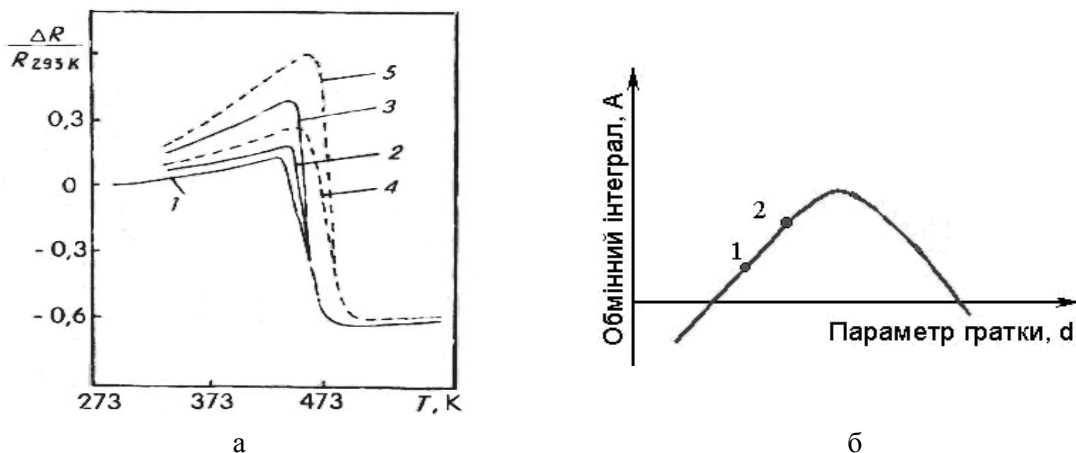


Рис. 2 – Температурна зміна електроопору сплаву НЗ6 за нагріву (1) та охолодження у вакуумі (2, 4) та водні (3, 5) (1...3 вміст вуглецю 0,01 мас. %; 4, 5 – 0,17 мас. %) (а) і вплив параметра ґратки на величину ефективної обмінної взаємодії у феромагнетиках [5] (б)

Зростання температури точки Кюрі за науглечування пояснено тим [5], що обов'язковою умовою існування феромагнетизму в металах є наявність позитивного знаку обмінної електронної взаємодії, який досягається лише в певному інтервалі значень параметра гратки (рис. 2б). Таким чином, змінюючи його величину шляхом легування, можна впливати на магнітні властивості сплавів. Наприклад, за науглечування очевидно має місце перехід з точки 1 в точку 2 (рис. 2б, ліва гілка кривої A(d) відповідає d-перехідним металам і їх сплавам), що підтверджено експериментально отриманим зростанням параметра гратки сплаву Н36 (рис. 3а, крива 1).

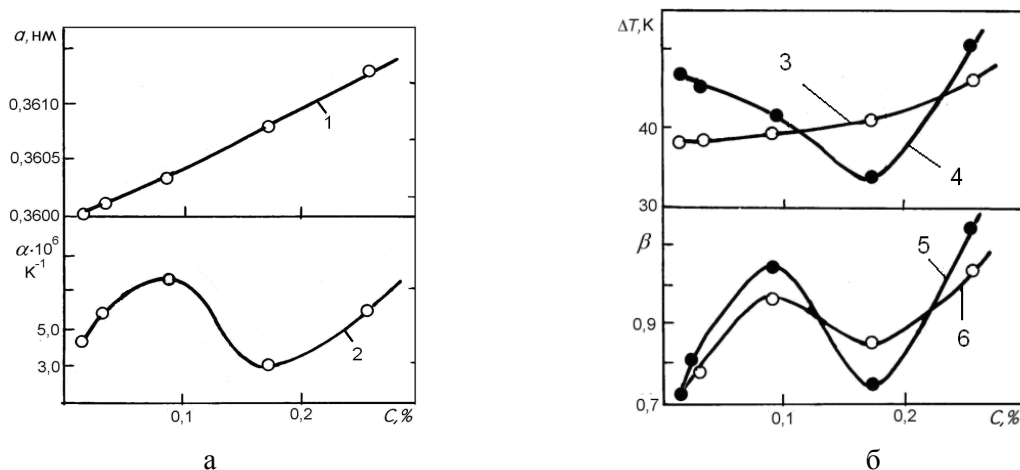


Рис. 3 – Вплив легування вуглецем на параметр гратки  $\alpha$  (1) і ТКЛР  $\alpha$  (2) (а) та параметр структурної однорідності  $\Delta T$  (3,4) та коефіцієнта впливу термічної обробки  $\beta$  (5, 6) сплаву Н36 у вакуумі (3, 5) і водні (4, 6) (б)

На основі проведених досліджень можна припустити, що науглечування сплаву Н36 повинно розширити температурну область існування низьких значень ТКЛР прямо пропорційно вмісту вуглецю. Однак безпосередні вимірювання (табл. 2) не підтвердили це припущення. Встановлено, що максимальне зростання верхньої температурної границі, де зберігається значення ТКЛР  $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , має місце за концентрації вуглецю 0,17 мас.%. При цій же концентрації спостерігається мінімальне значення ТКЛР легованого вуглецем інвару визначене за температури 500 К (рис 3а, крива 2).

Таблиця 1 – Вплив вуглецю на точку Кюрі сплаву Н36

Вміст вуглецю, мас. %	Температура Кюрі, К			
	Нагрів		Охолодження	
	вакуум	водень	вакуум	водень
0,01	475	471	475	474
0,03	478	475	479	478
0,09	486	484	496	493
0,17	491	492	503	498
0,26	504	502	520	512

Таблиця 2 – Вплив вуглецю на температурну межу існування мінімального ТКЛР

Вміст вуглецю, мас. %	0,01	0,03	0,09	0,17	0,26
$T_r, K$	470	455	420	500	445

Збільшення у водні висоти максимуму електроопору  $H$  (рис. 2а, криві 3, 5) зумовлене, на нашу думку, прискоренням релаксації гартувальних та магніострикційних напружень, а також зменшенням поверхневого магнетизму під час хемосорбції атомів водню. При дослідженні концентраційної залежності зміни параметра  $\Delta T$  у водні встановлено появу мінімуму при вмісті вуглецю 0,17 мас.%. (рис. 3б, крива 4), що вказує на покращення структурної однорідності сплаву Н36, очевидно, внаслідок впорядкування атомів вуглецю в  $\gamma$ -твердому розчині інвару і пришвидшення цього процесу розчиненням воднем.

Аналогічний результат отримали при вивченні взаємозв'язку між дифузійною рухливістю атомів вуглецю і ТКЛР. Для цього провели ізотермічні відпали загартованих зразків легованого інвару при 393 К протягом 20 год. у вакуумі та водні і дослідили зміну коефіцієнту впливу термічної обробки  $\beta = (\alpha_T - \alpha_3) / \alpha_3$ , де  $\alpha_T$  і  $\alpha_3$  – ТКЛР відпалених і загартованих зразків. Як бачимо (рис. 3б, крива 5), ТКЛР відпалених у вакуумі зразків зростає пропорційно вмісту втіленого вуглецю до його концентрації 0,09 мас.%, далі на залежності спостерігається мінімум. У присутності водню дифузійні процеси у сплаві Н36 стають інтенсивніші, що підтверджується ростом  $\beta$  при 0,9 та 0,26 мас.% С (крива 6). Однак при 0,17 мас.% С ТКЛР, порівняно з вакуумом, зменшується. Отриманий результат також можна пояснити, виходячи з того, що за вказаної концентрації вуглецю відбувається впорядкування його атомів по міжвузлях кристалічної ґратки і цей процес пришвидшується воднем. Крім того, провели розділення температурних залежностей електроопору на вуглечених зразків сплаву Н36 на магнітну і фононну складові (рис. 1б). З отриманих результатів витікає (рис. 4а), що зі збільшенням вмісту вуглецю магнітна складова електроопору (крива 2) монотонно зростає пропорційно росту параметра ґратки за навулечування (крива 1), а фононна (крива 3) проходить через мінімум, якісно змінюючись, як і ТКЛР (крива 4). Такий характер отриманих залежностей однозначно вказує на те, що причину появи оптимальної концентрації вуглецю (0,17 мас.%), яка покращує експлуатаційні властивості інвару, слід шукати не у зміні електронної структури сплаву Н36 під час легування, а в процесах, які відбуваються на атомному рівні і зумовлені дифузією та впорядкуванням атомів вуглецю по міжвузлях кристалічної ґратки.

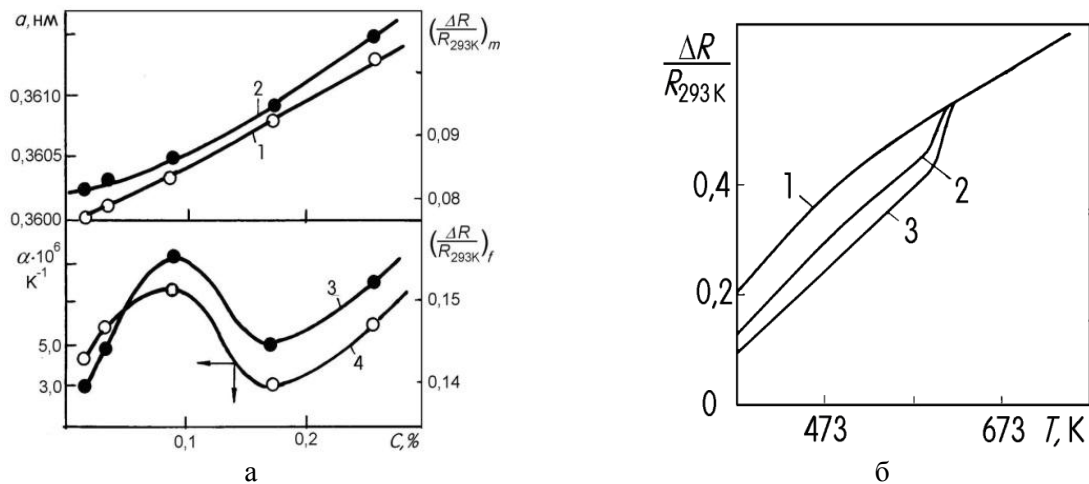


Рис. 4 – Вплив вуглецю на параметр ґратки  $a$  (1), ТКЛР  $\alpha$  (4), магнітну (2) і фононну (3) складові електроопору (а) і температурні залежності електроопору сплаву Н36 у вакуумі (1), водні (2) та легованого вуглецем 0,26 мас.% (3) (б)

### Вплив водню та вуглецю на параметри атомного впорядкування сплаву Н36.

Оскільки існує тісний зв'язок між процесами атомного впорядкування на вузлах та в міжвузлях кристалічної ґратки, вивчали вплив домішок втілення на кінетику формування впорядкованих атомних надструктур у сплаві Н36. В інварній області концентрацій системи Fe-Ni однозначно встановлено утворення впорядкованої надструктури FeNi з критичною температурою Курнакова  $T_k$  біля 600 К та мікрообластей ближнього атомного порядку типу Fe<sub>3</sub>Ni [11].

Теоретичне вивчення впливу домішок втілення на процес їх формування показало [12], що в їх присутності температура Курнакова повинна зростати і описується формулою

$$T_{kc} = T_k + \frac{1 + 3\tau_0}{K} \cdot \frac{\omega_{ABC}^2}{W} \cdot C_C, \quad (4)$$

де параметр  $\tau_0$  залежить тільки від складу сплаву,  $\omega_{ABC}$  – енергія зв’язку втілених атомів з атомами на вузлах,  $W$  – енергія впорядкування,  $C_c$  – концентрація домішки,  $K$  – постійна Больцмана.

Таким чином, якщо відомі експериментальні дані про залежність  $T_K$  від вмісту домішки, то, виходячи з формули (4), можна розрахувати енергії впорядкування і міжатомної взаємодії в сплаві:

$$W = -\frac{k \cdot T_k}{C_A(1-C_A)(1+\tau_0)}, \quad \omega_{ABC}^2 = \frac{k(T_{kc} - T_k) \cdot |W|}{C_c(1+3\tau_0)}. \quad (5)$$

Вплив наводнювання на кінетику формування надструктури FeNi вивчали, порівнюючи температурні залежності електроопору після термообробки у вакуумі ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па) та водні ( $P_{H_2} = 10^5$  Па). Встановлено (рис. 4б), що відпал зразків сплаву НЗ6 у вакуумі при 573 К протягом 30 год. не змінює монотонного характеру залежності  $R(T)$  (крива 1). Перші ознаки утворення впорядкованої структури у зразках вихідного сплаву НЗ6 (різке зменшення електроопору) спостерігаються після 6 год. відпалу у водні (крива 2). При чому зі збільшенням часу відпалу у водні до 30 год. температура Курнакова залишається незмінною, що можна пояснити його малою концентрацією  $H/Me = (5 \dots 8) \cdot 10^{-4}$ , а також тим, що водень взаємодіє з компонентами сплаву (Fe, Ni) антиферомагнітно.

За аналогічної обробки зразків сплаву НЗ6, легованих 0,26 мас.% вуглецю також утворюється надструктура FeNi (крива 3), але її температура Курнакова  $T_K$  на 12...15 К вища. При цьому має місце підвищення ступеня дальнього атомного порядку  $\eta$ , на що вказує більше зниження електроопору в результаті впорядкування, величина якого пропорційна  $\eta^2$  [13]. Розрахунки за формулами (5) показали, що енергія атомного впорядкування у сплаві НЗ6 складає  $W = -3,35 \cdot 10^{-20}$  Дж, а результуюча енергія міжатомної взаємодії для вуглецю  $\omega_{FeNiC} = -4,45 \cdot 10^{-20}$  Дж.

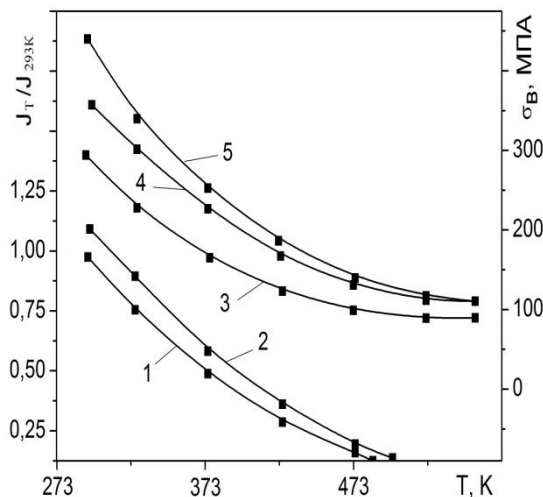


Рис. 5 – Температурні залежності намагніченості (1, 2) і межі міцності (3–5) сплаву НЗ6 у вихідному стані (1, 3) та легованого 0,17 мас. % С до (2, 4) та після (5) водневої обробки на атомне впорядкування

Крім того, у феромагнітних сплавах, що впорядковуються, існує зв’язок між енергією атомного впорядкування, спонтанною намагніченістю і температурами Кюрі та Курнакова [12]. Причому взаємозв’язок між температурою Кюрі  $T_C$  і ступенем дальнього атомного порядку  $\eta$  виражається співвідношенням:

$$T_C = 2(3R + \alpha \cdot \eta^2) / K_B, \quad (6)$$

де  $\alpha = 2J_{AB} - J_{AA} - J_{BB}$ ,  $R = a^2J_{AA} + b^2J_{BB} + 2abJ_{AB}$  – параметри, що характеризують обмінну взаємодію в бінарному сплаві АВ, а і b – атомні концентрації компонентів,  $K_B$  – стала Больцмана. Знаючи зміну  $T_C$  під час впорядкування, можна оцінити зміну ступеня

дальнього атомного порядку  $\eta$ . Вимірювання температурних залежностей електроопору дозволило встановити, що  $T_C$  після водневої термообробки на впорядкування (відпал при 600 К, 30 год. з наступною дегазацією) підвищується на  $20 \pm 3$  К. Враховуючи, що обмінні інтеграли  $J_{Fe-Fe} = -9$  МеВ,  $J_{Ni-Ni} = 52$  МеВ,  $J_{Fe-Ni} = 39$  МеВ [12], на основі співвідношення (6) розрахували, що, не зважаючи на незмінність температури Курнакова, під впливом розчиненого водню концентрацією  $H/Me = (5...8) \cdot 10^{-4}$  величина  $\eta$  у сплаві НЗ6 зростає майже на 25 %.

**Вплив водню та вуглецю на «інварне зміцнення» сплаву НЗ6.** Однією з найважливіших фізико-механічних характеристик інварних сплавів є «інварне зміцнення» – різке зростання межі міцності після охолодження нижче температури точки Кюрі. Під час дослідження впливу домішок втілення на «інварне зміцнення» сплаву НЗ6 (Fe – осн., Ni – 35,7, Mn – 0,50, Si – 0,26, C – 0,01, S – 0,005, P – 0,001) встановлено (рис. 1), що межа міцності  $\sigma_b$  після науглечування зростає (криві 3, 4) пропорційно зміні намагніченості (криві 1, 2). Фізичний механізм цього процесу полягає у наступному. З охолодженням нижче точки Кюрі  $T_C$  в інварних сплавах формується неоднорідна магнітна структура, в якій присутні флуктуації спінової густини, викликані утворенням сегрегацій атомів заліза (1...3 нм). При цьому їх результуючий магнітний момент не збігається з напрямком намагніченості в зразку. В області існування феромагнетизму об'єм ГЦК-гратки інвару збільшується внаслідок появи спонтанної магнітострикції. Це призводить до виникнення значних структурних напружень навколо сегрегацій атомів заліза і зростання  $\sigma_b$  сплаву. Крім того, через магнітну неоднорідність інвару феромагнітне перетворення в ньому відбувається не в точці Кюрі, а розтягнуте за температурою. Тому з віддаленням від  $T_C$  кількість спотворених структурних мікрообластей у феромагнітній матриці зростатиме пропорційно росту намагніченості при охолодженні, що і викликає ефект «інварного зміцнення». Пластичність зразків при цьому майже не змінюється ( $\delta=20$  %).

Легування вуглецем, збільшуючи параметр гратки інвару, посилює ефективну обмінну взаємодію у сплаві і інтенсифікує зростання  $\sigma_b$ . Оскільки склад компонентів у сплаві НЗ6 не відповідає стехіометричному для надструктури FeNi, то за її формування об'ємна частка збагачених залізом мікрообластей зростатиме, посилюючи магнітну неоднорідність інвару. Експериментальна перевірка цього припущення показала (рис. 1, криві 3 і 5), що порівняно з вихідним сплавом НЗ6 впорядкований легований сплав за температури 293 К додатково зміцнюється на 40 %.

**Висновки.** Легування вуглецем (0,26 мас.%) сплаву НЗ6 призводить до зростання температури точки Кюрі  $T_C$  порівняно з вихідним сплавом на  $30 \pm 3$  К. За наявності розчиненого водню ефект зменшується на 8...10 К, що пояснюється антиферомагнітною взаємодією атомів водню з атомами Fe і Ni.

Показано, що  $T_C$  після водневої термообробки на атомне впорядкування сплаву НЗ6 підвищується на  $20 \pm 3$  К. Це дозволило розрахувати, що за концентрації  $H/Me = (5...8) \cdot 10^{-4}$  ступінь дальнього атомного порядку структури FeNi зростає майже на 25 % за незмінності температури точки Курнакова  $T_K$ . На відміну від водню, легування вуглецем (0,26 мас.%) збільшує  $T_K$  на 12...15 К, що дозволило встановити енергію міжатомної взаємодії атомів C з компонентами сплаву НЗ6 –  $\omega_{FeNiC} = -4,45 \cdot 10^{-20}$  Дж.

Розчинений водень пришвидшує дифузійну рухливість атомів вуглецю і за його вмісту 0,17 мас.% вони впорядковуються по міжвузлях кристалічної гратки. Саме за цієї концентрації вуглецю встановлена максимальна температура (500 К) існування мінімального значення ТКЛР  $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  у сплаві НЗ6.

Поєднання легування вуглецем та термообробки у водні, яка стимулює процеси формування атомних впорядкованих структур, дозволяє покращити міцнісні властивості інварних сплавів («інварне зміцнення») – при 293 К  $\sigma_b$  сплаву НЗ6 зростає на 40 %.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Похмурський В. І. Вплив водню на дифузійні процеси в металах / В. І. Похмурський, В. В. Федоров. – Львів : ФМІ НАНУ, 1998. – 207 с.
2. Федоров В. В. Застосування водню в термічній обробці металів і сплавів / В. В. Федоров // Фізико–хімічна механіка матеріалів : зб. наукових праць під ред. В. В. Панасюка. – Львів : НАН України, Фіз.-мех. ін.-т ім. Г. В. Карпенка, 2010. – С. 372-392.
3. Федоров В. В. Вплив водню на фазовий склад та фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів / В. В. Федоров // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 2. – С. 67-76.
5. Захаров А. И. Прецезионные сплавы с упругими, тепловыми и электрическими аномалиями / А. И. Захаров, Е. Х. Захаров, Л. Л. Жуков // Металлургия: стали, сплавы, процессы. – М. : Металлургия, 1982. – С. 136-144.
6. Вонсовский С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М. : Наука, 1971. – 1024 с.
7. Приборы и устройства для измерения, контроля и автоматизации производственных процессов. – К. : Наук. думка, 1976. – 58 с.
8. Федоров В. В. Влияние водорода на процессы атомного упорядочения в сплавах на основе переходных металлов / В. В. Федоров, П. Н. Антонец, Ю. Д. Никифоров. – Львов, 1988. – 53 с.
9. Применение метода электропроводности для исследования термостабильности систем «металл–покрытие» / В. И. Похмурский, В. В. Федоров, О. Р. Соколовский и др. // Физ.-хим. механика материалов – 1986. – № 2. – С. 73-75.
10. Федоров В. В. Влияние водорода на магнитную и фононную составляющие относительного изменения электросопротивления никеля и железа / В. В. Федоров, В. М. Сидоренко // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – № 2. – С. 118-120.
11. Максимович Г. Г. Микромеханические исследования свойств металлов и сплавов / Г. Г. Максимович. – К. : Наук. думка, 1974. – 240 с.
12. Алиев С. С. Низкотемпературные фазовые превращения в железоникелевых сплавах при облучении электронами / С. С. Алиев, П. Л. Грузин, А. З. Меньшиков и др. // Металлофизика. – 1985. – № 5. – С. 80-86.
13. Смирнов А. А. Теория сплавов внедрения / А. А. Смирнов. – М. : Наука, 1979. – 365 с.
14. Смирнов А. А. Теория электросопротивления сплавов / А. А. Смирнов. – К. : Изд-во АН УССР, 1960. – 48 с.
15. Влияние магнитного упорядочения на свойства аустенитных сплавов / В. В. Сагарадзе, Н. Д. Земцова, Е. И. Старченко и др. // Физика металлов и металловед. – 1983. – № 1. – С. 113-124.

**Наговская И.В., Федоров В.В., Прокопюк В.А., Бачинский Ю.Г. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ВНЕДРЕНИЯ (H<sub>2</sub>C) НА ПРОЦЕССЫ МАГНИТНОГО И АТОМНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНВАРНОГО СПЛАВА НЗ6**

*Исследовано влияние водорода на параметры магнитного и атомного упорядочения в легированном углеродом (до 0,3 мас. %) сплаве НЗ6. Установлено, что легирование углеродом (0,26 мас.%) приводит к увеличению температуры точки Кюри T<sub>C</sub> на 30 К, которая при наводороживании уменьшается на 8...10 К. Показано, что растворенный водород увеличивает степень дальнего атомного порядка структуры FeNi на 25 % при неизменности температуры точки Курнакова T<sub>K</sub>. При этом присутствие атомов водорода интенсифицирует диффузионную подвижность атомов углерода и при его содержании 0,17 мас. % они упорядочиваются по междуузлиях кристаллической решетки. При этой концентрации установлена максимальная температура (500 К) существования минимального значения ТКЛР  $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  в сплаве НЗ6. Показано, что совмещение легирования углеродом и термообработки в водороде на атомное упорядочение позволяет улучшить прочностные свойства сплава НЗ6 при 293 К  $\sigma_0$  на 40 %.*

**Ключевые слова:** водород, углерод, инвар, магнитное и атомное упорядочение, электросопротивление.

**Nagovska I.V., Fedorov V.V., Prokopiuk V.A., Bachynskiy Yu.H.** EFFECT OF IMPURITIES EMBODIMENT (H<sub>2</sub>, C) ON THE PROCESSES OF MAGNETIC AND ATOMIC ORDERING AND PERFORMANCE INVAR N36 ALLOY

*The influence of hydrogen on the magnetic parameters and atomic ordering in alloy doped with carbon N36 (0.3 wt. %) was studied. It was established that doping with carbon (0.26 wt. %) leads to an increase in Curie temperature  $T_C$  by 30 K, which is reduced by hydrogenation to 8...10 K. It is shown that dissolved hydrogen increases the long-range atomic order structure of FeNi by 25 % under immutability of Kurnakov point temperature  $T_K$ . Presence of hydrogen atoms intensifies diffusion mobility of carbon atoms and under its content 0.17 wt. % they are arranged in the interstices of the crystal lattice. Under this concentration maximum temperature (500 K) was established for the existence of minimum TCLE  $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  in the N36 alloy. It is shown that the combination of carbon doping and heat treatment in hydrogen for atomic ordering allows to improve the strength properties of the alloy N36) – at 293 K  $\sigma_B$  increases by 40 %.*

**Keywords:** hydrogen, carbon, invar, magnetic and atomic ordering, electrical resistance.

© Наговська І.В., Федоров В.В., Прокоп'юк В.А., Бачинський Ю.Г.

Статтю прийнято  
до редакції 22.09.14

## О ВОЗМОЖНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЧИСЛОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ И ИХ УТОЧНЕНИИ

*Настасенко В.А.*

*Херсонская государственная морская академия*

*В настоящее время фундаментальные физические константы: гравитационная постоянная  $G$ , постоянная Планка  $h$  и скорость  $c$  света в вакууме, определяются экспериментальным путем с максимальной точностью от 5 ( $G$ ), до 9 ( $c$ ) знаков. Однако в данной работе найдены системы расчетных зависимостей, вытекающие из взаимосвязи констант  $c$ ,  $G$ ,  $h$ , с Планковским временем  $t_p$  и частотой  $\nu_p$ , позволяющие определить их более точно. На этой базе в найденных численных значениях  $G$ ,  $h$ ,  $c$  выделены периодически повторяющиеся десятичные дроби, позволившие повысить точность до 18 знаков, что значительно опережает современные технические возможности их экспериментального определения. Совокупность полученных данных расширяет знания о материальном мире и о Вселенной в целом, и не противоречит приведенным CODATA численным значениям  $G$ ,  $h$ ,  $c$ , поэтому они могут быть рекомендованы для использования в дальнейших исследованиях.*

***Ключевые слова:** фундаментальные физические константы, гравитационная постоянная, квантование физических величин, точность измерений.*

**Введение. Связь проблемы с основными научными направлениями.** Работа относится к основам материального мира и ко всем разделам физики и естествознания, связанным с использованием фундаментальных физических констант – гравитационной постоянной  $G$ , постоянной Планка  $h$  и скорости света в вакууме  $c$ , которые действуют, практически на всех уровнях мироздания, от субатомного, до глобального – Вселенной в целом. Потребность повышения их точности обусловлена научно-техническими интересами во всех областях теоретической и прикладной физики, особенно – квантовой физики и физики элементарных частиц, физики космоса, а также астрономии, космологии и других наук, где точность конечных результатов существенно расширяет знания о законах материального мира.

**Анализ состояния проблемы и постановка задачи.** Фундаментальные физические константы  $G$ ,  $h$ ,  $c$  входят во все основные физические законы [1], определяющие основы мироздания, например – Всемирного тяготения (1), квантового излучения энергии (2), связи массы и энергии (3) и др.:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} (H),$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – массы двух точечных объектов, кг, размещенных на расстоянии  $r$  между ними:

$$E_\nu = h\nu (\text{Дж}), \quad (2)$$

где  $\nu$  – частота излучения, Гц;

$$E_g = mc^2 (\text{Дж}), \quad (3)$$

где  $m$  – масса тела, кг.

По состоянию на 2010 год, Комитетом данных для науки и техники (CODATA) рекомендуются следующие численные значения фундаментальных физических констант [2]:

1) гравитационной постоянной:

$$G = 6,67384 \pm 0,00080 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}, \quad (4)$$

2) постоянной Планка:

$$h = 6,62606957 \pm 0,00000029 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad (5)$$

3) скорости света в вакууме:

$$c = 0,299792458 \cdot 10^9 \frac{\text{М}}{\text{с}} (\text{точно}). \quad (6)$$

В рамках общего развития науки и техники, точность значений фундаментальных физических констант постоянно повышается. Если скорость света  $c$  считается определенной точно [3], то предыдущее значение  $h$ , рекомендованное CODATA в 1986 г, составляло величину:

$$h = 6,62607554 \pm 0,0000040 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (7)$$

За 25 лет выполнения сложных и дорогостоящих экспериментов, значение  $h$  было уточнено до 5-го [4] и 6-го [5] знаков, однако остается неточно определенным для 7-го и 8-го знаков, поэтому, исходя из общего роста требований к современному развитию науки и техники, продолжается его уточнение.

Для гравитационной постоянной  $G$  проблема повышения точности ее определения стоит более остро [5, 6], что связано со сложностью выполнения условий, необходимых для этого эксперимента, поэтому  $G$  является наименее точно определенной фундаментальной физической константой (4), по сравнению с другими (5), (6). Кроме того, CODATA в 2008 г. рекомендовал предыдущее значение  $G$  (8), сильно отличающееся от нынешнего (4) и отказался от значения  $G$  (9), определенного с более высокой точностью в 2000 г. [4] на базе эксперимента с движением шаров на плоскости, а в 2010 году заменил значение (8) значением (4):

$$G = 6,67428 \pm 0,00067 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}, \quad (8)$$

$$G = 6,67390 \pm 0,00013 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}. \quad (9)$$

Объяснить это можно более сильным доверием CODATA к экспериментальным определениям  $G$  на базе крутильных весов, в которых были уточнены условия закручивания нити [7, 8].

Однако в работах [5, 6] была отмечена предпочтительность величины  $G$ , определенной в 2000 г. [4], и была предложена строго формализованная методика расчетов, для которой найдены новые физико-математические закономерности, создающие возможность точного аналитического определения гравитационной постоянной  $G$  расчетным путем. Она основана на использовании других, более точно определенных экспериментально фундаментальных физических констант – скорости света в вакууме  $c$  и постоянной Планка  $h$ . В ее основу было положено квантование Планковского времени  $t_p$  (10), полученное на базе трех фундаментальных физических констант  $G$ ,  $h$ ,  $c$  со временем в 1 секунду (11), равным 1/86400 доле Земных суток, длящихся в период весеннего равноденствия, 21 марта, что сводит его к строго обоснованной астрономической величине, связанной с вращением Земли вокруг собственной оси и ее движением вокруг Солнца в зоне среднего радиуса эллиптической орбиты [9]:

$$t_p = \sqrt{\frac{hG}{c^5}} = \sqrt{\frac{6,62606957 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right)}{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right)\right)^5}} = 13,5134 \cdot 10^{-44} (\text{с}), \quad (10)$$

$$n_t = \frac{1(\text{с})}{t_p} = \frac{1(\text{с})}{13,5134 \cdot 10^{-44} (\text{с})} = 7,40006 \cdot 10^{42}. \quad (11)$$

Учитывая, что квантовая величина  $n_t$  сводится к реальной физической величине, характеризующей гравитационное поле, – Планковской частоте  $n_t = \nu_p$  [10], на этой базе была выдвинута гипотеза о точном квантовании величины  $n_t$ , что позволило уточнить численную величину Планковской частоты  $\nu_p$  до 9 знаков ( $\nu_p = 7,40000000 \cdot 10^{42} \text{ с}^{-1}$ ) и довести точность гравитационной постоянной  $G$  до 9 знаков (12):

$$G = \frac{t_p^2 c^5}{h} = \frac{c^5}{\nu_p^2 h} = \frac{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right)\right)^5}{(7,40000000 \cdot 10^{42} (\text{с}^{-1}))^2 \cdot 6,62606957 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с})} = 6,67396744 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right). \quad (12)$$

Исходя из предложенной в работах [5, 6] методики аналитического определения гравитационной постоянной  $G$ , можно предположить, что в рамках выявленной связи между константами  $G, h, c$  возможно также их дальнейшее взаимное уточнение.

Поиск возможных взаимосвязей и уточнение численных величин фундаментальных физических констант  $G, h, c$  является главной **целью** выполняемой **работы**. Ее научную новизну составляет поиск новых физико-математических закономерностей для уточнения численных величин фундаментальных физических констант  $G, h, c$ .

**Поиск путей реализации поставленной цели.** В основу дальнейших исследований была положена вытекающая из зависимости (13) периодичность численной величины Планковского времени  $t_p$ , полученная при уточнении величины гравитационной постоянной  $G$  (12):

$$t_p = \sqrt{\frac{hG}{c^5}} = \sqrt{\frac{6,62606957 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 6,67396744 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right)}{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right)\right)^5}} = 13,5135135 \cdot 10^{-44} (\text{с}). \quad (13)$$

Из выявленной строгой периодичности Планковского времени  $t_p = 13,5|135| \cdot 10^{-44} \text{ с}$  (13), найдена также строгая периодичность Планковской длины  $l_p = 4,051249|432| \cdot 10^{-35} \text{ м}$ , вытекающая из зависимости (14), полученной на базе представления скорости  $c$  света в вакууме через соотношение Планковской длины  $l_p$  и времени  $t_p$  (15):

$$l_p = 13,5135135135135 \cdot 10^{-44} (\text{с}) \cdot 0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right) = 4,05124943243243 \cdot 10^{-35} (\text{м}); \quad (14)$$

$$c = \frac{l_p}{t_p} = \frac{4,05124943243243 \cdot 10^{-35} (\text{м})}{13,5135135135135 \cdot 10^{-44} (\text{с})} = 0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right). \quad (15)$$

Таким образом, можно предположить, что периодичность свойственна Планковским величинам  $l_p$  и  $t_p$ , уникальность которых состоит в том, что получены они на базе лишь 3-х фундаментальных физических констант  $G, h, c$ , (10), (16),

$$l_p = \sqrt{\frac{hG}{c^3}} = \sqrt{\frac{6,62606957 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 6,67396744 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right)}{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right)\right)^3}} = 4,05124943 \cdot 10^{-35} (\text{М}). \quad (16)$$

Полученные данные о периодичности численных значений Планковского времени (13) и Планковской длины (14) позволяют предположить возможность периодичности у численных значений составляющих их констант  $G$ ,  $h$ ,  $c$ .

**Определение периодичности и уточнение численных величин фундаментальных физических констант.** Исходя из найденной периодичности численного значения Планковского времени (13) и длины (14), в численном значении  $G$  (12) были выделены 2 группы в дробной части: |6739| и |6744|, которые также позволяют предположить возможность периодичности  $G$  с числовым значением |6739|, поскольку точность последних двух чисел в расчетах (12) не гарантируется. Найденное явление периодичности позволяет использовать его в дальнейших исследованиях.

Приняв  $G$  точной в пределах 12 знаков численной величиной десятичной дроби с периодом |6739| (17), при постоянстве скорости света  $c$ , и при адекватном увеличении точности до 12 знаков численного значения Планковской частоты  $\nu_p$ , после преобразований исходной зависимости (12) найдем новое численное значение постоянной Планка (18):

$$G = 6,673967396739 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right), \quad (17)$$

$$h = \frac{t_p^2 c^5}{G} = \frac{c^5}{\nu_p^2 G} = \frac{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right)\right)^5}{\left(7,400000000000 \cdot 10^{42} (\text{с}^{-1})\right)^2 \cdot 6,673967396739 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right)} = \quad (18)$$

$$= 6,626069616158 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}).$$

В найденном новом численном значении  $h$  (18) также прослеживается возможность периодичности численного значения десятичной дроби |61|, если для ее достижения уточнить скорость света  $c$ , преобразовав исходную зависимость (12) в зависимость (19) и подставив в нее уточненные до 18 знаков, с учетом их периодичности, значения  $\nu_p$ ,  $G$ ,  $h$ :

$$c = \sqrt[5]{\nu_p^2 G h} = \sqrt[5]{\left(7,400000000000 \cdot 10^{42} (\text{с}^{-1})\right)^2 \cdot 6,673967396739 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right) \cdot 6,62606961616161 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с})} = \quad (19)$$

$$= 0,299792458000034646 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right).$$

Таким образом, периодичность найденных численных значений 3-х фундаментальных физических констант  $G$ ,  $h$ ,  $c$  прослеживается до 18 знаков, а все найденные периодические дроби находятся в пределах погрешностей экспериментального измерения  $G$  (4),  $h$  (5),  $c$  (6), рекомендованных CODATA.

Достичь такой согласованной периодичности искусственным путем при реальном отсутствии ее у численных величин  $G$ ,  $h$ ,  $c$ , практически невозможно, а случайность одновременного проявления найденной периодичности у 3-х величин  $G$ ,  $h$ ,  $c$  может быть оценена величиной  $p = 10^{-5} \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-16} = 10^{-30}$ . Это позволяет повысить точность у всех

констант  $G, h, c$  до 18 знаков, что значительно опережает реальные возможности такого точного определения их экспериментальным путем. Кроме того, полученная точность физических констант  $G, h, c$  существенно превышает точность всех известных и используемых в настоящее время в экспериментальных и теоретических исследованиях физических величин.

Следует учесть, что после 18 знаков полного совпадения периодичности у всех констант  $G, h, c$  не выявлено. Это можно объяснить тем, что их величины не абсолютно строгие, а статистико-вероятностные, с колебаниями  $N$  значений в пределах точности  $T$  и погрешности  $\Delta$ :

$$T = N \pm \Delta = N \pm \sqrt{N} = (G, h, c)10^{36} \pm 10^{18}. \quad (20)$$

Однако приведенные утверждения могут быть лишь косвенным доказательством верности предполагаемой периодичности фундаментальных физических констант, поэтому на данном этапе научных знаний предлагаемая работа может быть признана, как гипотеза, а найденные численные значения  $G, h, c$  следует считать прогнозируемыми.

Сравнение численных значений предлагаемых и известных величин гравитационной постоянной  $G$ , постоянной Планка  $h$ , скорости  $c$  света в вакууме, в пределах современной их точности, найденной экспериментально и рекомендованной CODATA, приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение численных значений предлагаемых и известных величин фундаментальных физических констант  $G, h, c$

<i>Предлагаемое численное значение</i>	<i>Известное в настоящее время численное значение</i>
Гравитационная постоянная $G, \left(\frac{M^3}{K^2 \cdot c^2}\right)$ ; $(6,6739673967396739 \pm 0,0000000000000000008) \cdot 10^{-11}$	$(6,67390 \pm 0,00013) \cdot 10^{-11}$
Постоянная Планка $h, \left(\frac{K^2 \cdot M^2}{c}\right)$ $(6,6260696161616161 \pm 0,0000000000000000008) \cdot 10^{-34}$	$(6,62606957 \pm 0,00000029) \cdot 10^{-34}$
Круговая постоянная Планка $\hbar, \left(\frac{K^2 \cdot M^2}{c}\right)$ $(1,05457173268313979 \pm 0,0000000000000000003) \cdot 10^{-34}$	$(1,05457172 \pm 0,00000029) \cdot 10^{-34}$
Скорость света в вакууме $c, \left(\frac{M}{c}\right)$ $(0,299792458000034646 \pm 0,0000000000000000005) \cdot 10^9$	$0,299792458 \cdot 10^9$

Для окончательного вывода о достоверности найденных численных значений  $G, h, c$ , требуется их проверка. Пока экспериментальные возможности их подтверждения отсутствуют, однако они возможны при исследовании далекого космоса и глубин Вселенной. На первом этапе полученные новые численные значения  $G, h, c$  могут быть подтверждены экспериментально при сравнении расчетных траекторий полета космических комет, астероидов, болидов и искусственных спутников, движущихся в околоземном и межпланетном пространстве, с их реальными траекториями. При этом подтверждение периодичности для хотя бы для одной из более просто и точно определяемых фундаментальных физических констант, например – постоянной Планка, позволит в рамках найденной строгой теоретической связи данных констант по зависимости (12) автоматически перенести полученные результаты на другие константы.

### Выводы и рекомендации

1. Впервые показана возможность формирования численного значения гравитационной постоянной  $G$  с периодичной десятичной дробью |6739|.
2. Впервые показана возможность формирования численного значения постоянной Планка  $h$  с периодичной десятичной дробью |61|.
3. Впервые показана возможность формирования численного значения скорости света в вакууме  $c$  с периодичной десятичной дробью |46|.
4. Для всех трех фундаментальных физических констант  $G$ ,  $h$ ,  $c$  периодичность десятичных дробей прослеживается до 18 знаков.
5. Для расчета новых численных значений фундаментальных физических констант предложены новые строгие математические зависимости, не противоречащие физическому смыслу данных величин и результатам их экспериментального определения.
6. Все предлагаемые периодические дробные части физических констант  $G$ ,  $h$ ,  $c$ , находится в пределах погрешностей их измерения, что позволяет повысить их точность до 18 знаков и предложить CODATA рассмотреть возможность их публикации, как прогнозируемых в дальнейших исследованиях:

для гравитационной постоянной  $G$  численное значение:

$$G = (6,6739673967396739 \pm 0,000000000000000008) \cdot 10^{-11} \left( \frac{M^3}{K^2 \cdot C^2} \right); \quad (21)$$

для постоянной Планка  $h$  численное значение:

$$h = (6,6260696161616161 \pm 0,000000000000000008) \cdot 10^{-34} \left( \frac{K^2 \cdot M^2}{C} \right); \quad (22)$$

для скорости  $c$  света в вакууме численное значение:

$$c = (0,299792458000034646 \pm 0,000000000000000005) \cdot 10^9 \left( \frac{M}{C} \right). \quad (23)$$

7. Окончательные рекомендации для численных значений констант  $G$ ,  $h$ ,  $c$  могут быть приняты после экспериментальных исследований, однако их непротиворечивость известным численным значениям CODATA, позволяет применять их в научных исследованиях, при этом совокупность полученных данных расширяет имеющиеся знания о материальном мире и Вселенной в целом.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физический энциклопедический словарь / Под общ. ред. А. М. Прохорова ; Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А.С. Воронов-Романов и др. – М. : Сов. Энциклопедия, 1983. – 928 с.
2. CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants
3. Политехнический словарь / Ред. кол. : А.Ю.Ишлинский (гл. ред.) и др. – М. : Сов. энциклопедия, 1989. – С. 134, 382, 486, 638-640.
4. Phys.Web.Ru >> Постоянные | Беспрецедентное измерение гравитационной постоянной // По материалам бюллетеня The American Institute of Physics. Bulletin of Physic News. Number 482. May 3 (2000).
5. Настасенко В .А. Новые возможности аналитического уточнения величины гравитационной постоянной / В. А. Настасенко // Науковий вісник ХНТУ : науковий журнал. – Херсон, ХНТУ 2011. – № 4 (43). – С. 93-99.
6. Настасенко В. А. О возможности уточнения значения гравитационной постоянной расчетным путем // Материалы Междунар. науч.-техн. конф.

«Высокопроизводительные вычислительные системы – 2013». – К., НУТУ «КПИ», 2013. – С. 266-272 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.HPS-UA-13>

7. Phys. Rev. Lett. 105 110801 (2010) в ArXiv.org

8. Игорь Иванов. Новые измерения гравитационной постоянной еще сильнее запутывают ситуацию. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://elementy.ru/news/432079>

9. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц / Г. Д. Бурдун. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – С. 173-175.

10. Настасенко В. А. Открытие волновых параметров гравитационного поля // V Всеукраїнська наук.-техніч. конф. «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» : тези наук. доповідей. – Кременчук : КДПУ, 2006. – С. 19-20.

**Настасенко В.А. ПРО МОЖЛИВУ ПЕРІОДИЧНІСТЬ ЧИСЛОВИХ ЗНАЧЕНЬ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ КОНСТАНТ ТА ЇХ УТОЧНЕННЯ**

*В даний час фундаментальні фізичні константи: гравітаційна стала  $G$ , стала Планка  $h$  і швидкість  $c$  світла у вакуумі визначаються експериментальним шляхом з максимальною точністю від 5 ( $G$ ), до 9 ( $c$ ) знаків. Однак в даній роботі знайдені системи розрахункових залежностей, що витікають із взаємозв'язку констант  $G$ ,  $h$ , з Планківським часом  $t_p$  і частотою  $\nu_p$ , що дозволяють визначити їх точніше. На цій базі в знайдених чисельних значеннях  $G$ ,  $h$ ,  $c$  виділені десяткові дробки, що періодично повторюються, які дозволили підвищити точність до 18 знаків, що значно випереджає сучасні технічні можливості їх експериментального визначення. Сукупність отриманих даних розширює знання про матеріальний світ і про Всесвіт в цілому, і не суперечать приведеним CODATA чисельним значенням  $G$ ,  $h$ ,  $c$  і можуть бути рекомендовані для використання в подальших дослідженнях.*

**Ключові слова:** фундаментальні фізичні константи, гравітаційна постійна, квантування фізичних величин, точність вимірювань.

**Nastasenko V.A. ABOUT POSSIBLE PERIODICITY OF NUMERICAL VALUES OF FUNDAMENTAL PHYSICAL CONSTANTS AND THEIR SPECIFICATION**

*Presently fundamental physical constants: the gravity constant  $G$ , the Planck constant  $h$  and speed of light  $c$  in vacuum are determined experimentally and have maximal exactness from 5 ( $G$ ), to 9 ( $c$ ) signs. However there were found systems of calculation dependences resulting from interconnection of constants  $c$ ,  $G$ ,  $h$  with the Planck's time  $t_p$  and frequency  $\nu_p$ , which allow to find them numeral values more precisely. On this base recurring decimals were singled out in the found numerical values of  $G$ ,  $h$ ,  $c$  which allowed to enhance exactness to 18 signs, that considerably passes ahead modern economic feasibilities for their experimental determination. The aggregate of findings extends knowledge about the material world and Universe on the whole and does not contradict the present numerical values of  $G$ ,  $h$ ,  $c$ ; that is why they can be recommended for the use in subsequent researches.*

**Keywords:** fundamental physical constants, gravity constant, quantification of physical sizes, measurement precision.

© Настасенко В.О.

Статтю прийнято  
до редакції 30.06.14

УДК 667.64:678.026

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Нигалатий В.Д.*

*Херсонская государственная морская академия,*

*Погребняк И.Ф., Шарко А.В.*

*Херсонский национальный технический университет*

*При проведении закалки алюминиевых сплавов может возникнуть пережог, проявляющийся в снижении механических свойств. Механические испытания довольно трудоемки. При металлографическом анализе за начальную стадию пережога принимается различная степень округления зерен, что не всегда соответствует действительному состоянию материала. Выполнены акустические измерения коэффициента затухания ультразвуковых волн и резонансной частоты образования стоячей волны. Установлено, что по измерению коэффициента затухания можно выявлять установившуюся стадию пережога, но не его начальный переход. Вместе с тем, определить начальную стадию пережога можно по уменьшению резонансной частоты. Предлагаемый метод является более эффективным по сравнению с механическими испытаниями и металлографическим анализом и может быть рекомендован как средство оценки технологических свойств материалов.*

*Ключевые слова:* физико-механические свойства, алюминиевые сплавы, акустические методы.

**Актуальность работы** объясняется следующими обстоятельствами. На стадии изготовления изделий, конструкционный материал должен обладать высокими пластическими свойствами и малым сопротивлением деформации для облегчения механической обработки и формообразования изделий. На завершающей стадии технологическими процессами производства предусматривается выполнение операций термической обработки изделий и полуфабрикатов с целью придания им комплекса высоких механических свойств. Решение проблемы определения механических свойств материалов, изменяющихся при термообработке, методами неразрушающих испытаний, актуально, экономически обосновано и необходимо для производства.

**Анализ публикаций по обозначенной проблеме** обнаруживает, что, не смотря на очевидные преимущества методов неразрушающего контроля прочностных характеристик конструкционных материалов, сведения об их промышленном внедрении крайне малочисленны [1–5]. К трудностям внедрения следует отнести прежде всего тот факт, что еще до того, как приступить к обычным технологическим операциям, связанным с изучением объекта контроля, его геометрических размеров и возможных режимов намагничивания и прозвучивания, для каждого материала необходимы предварительные экспериментальные исследования по установлению взаимосвязи прочностных, физико-механических и технологических свойств для данного процесса структурообразования материала, определению корреляционных характеристик, отображающих тесноту этих связей и построению соответствующих тарировочных зависимостей. Подобные сведения в литературе практически отсутствуют.

**Цель статьи** – изучить взаимосвязь физико-механических свойств с технологическими параметрами алюминиевых сплавов.

**Изложение основного материала.** В качестве объекта исследования выбраны алюминиевые сплавы, обладающие низкой способностью к межкристаллической коррозии вследствие воздействия агрессивных сред при изменяющихся внешних условиях функционирования, прочностью и малым удельным весом в общей конструкции изделия. Алюминиевые сплавы подвергаются закалке с целью получения пересыщенного твердого раствора, из которого при последующем старении выпадает мелкодисперсная фаза, упрочняющая сплав. Нижний предел температуры нагрева под закалку определяется необходимостью обеспечения условий для получения твердого раствора, в то время, как

верхний предел определяется температурой, выше которой имеет место пережог сплава, т.е. местное оплавление границ зерен.

При проведении закалки при температурах близких к температуре солидуса вследствие неточности измерения температуры может возникнуть оплавление в структуре. Оно проявляется в образовании участков литой структуры и в снижении механических свойств. Поэтому для контроля пережога применяются механические испытания и металлографический анализ образцов-свидетелей, которые закладывают в печь вместе с партией серийных деталей. Однако в начальной стадии пережога образцы-свидетели имеют высокие механические свойства и высокий уровень статической прочности. Поэтому на практике механические испытания применяются для выявления окончательной стадии пережога. Полуфабрикаты, не прошедшие такой контроль, считаются бракованными и не допускаются в производство.

Таким образом, после закалки термоупрочняемых алюминиевых сплавов для выявления начальной стадии пережога осуществляется металлографический анализ микроструктуры образцов-свидетелей. Это подтверждается тем, что пережог деталей из этих сплавов характеризуется неравномерным травлением границ зерен твердого раствора с местным чрезмерным их утолщением, округлением этих границ и проявлением внутри зерен скоагулированных включений структурных составляющих сплава.

Как показывает практика, использования алюминиевых сплавов в различных отраслях техники и технологий, металлографический анализ является довольно трудоемким. Контроль по образцам-свидетелям не дает достаточной гарантии качества всей партии термообрабатываемых деталей. Контроль одной детали из партии, связанный с изготовлением большого количества макрошлифов, вырезанных из различных ее зон, их травлением и просмотром, так же не всегда является эффективным средством выявления пережога, так как возможны случаи перебраковки изделия. За начальную стадию пережога при просмотре микрошлифов принимается разная степень округления зерен, что не всегда соответствует действительному состоянию материала. Поэтому в настоящее время проводятся большие работы по разработке и внедрению в производство методов стопроцентного неразрушающего контроля термообработки деталей из алюминиевых сплавов. Широкое распространение получили различные электромагнитные методы, основанные на измерении удельного электрического сопротивления алюминиевых сплавов. Изменение этой характеристики для некоторых марок алюминиевых сплавов хорошо коррелирует с изменением механических свойств. Однако недостатком этих методов является сильная зависимость результатов измерений от химического состава материала даже в пределах одной марки материала. В данной работе сделана попытка использования для этих целей акустических методов.

Для сравнения механических свойств металлов, определяемых акустическими методами, необходима идентичность исходной структуры и технологических процессов воздействия на материал. На сплавах Д16, АК4-1 и АК6 из трех разных плавок каждого сплава были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 25 мм и длиной 90 мм. Образцы подвергались закалке при температуре от 480 °С до 580 °С с последующим охлаждением в воде. Определение коэффициента затухания ультразвука производилось путем сравнения амплитуд двух последовательных эхо-сигналов по формуле:

$$\alpha = \frac{\ln(A_1 / A_2)}{2l},$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания ультразвука;  $l$  – длина образца в направлении прозвучивания;  $A_1, A_2$  – амплитуды последовательных эхо-сигналов.

Измерения коэффициента затухания производились на частоте 5 МГц.

В качестве другой измеряемой акустической характеристики использовалась частота образования устойчивого резонанса высших гармоник. В образце, помещенном в иммерсионную ванну с водой, с помощью пьезопреобразователя (на частоту 2,5 МГц),

питающегося от генератора ГЗ-41, возбуждались непрерывные ультразвуковые колебания. Упругие колебания, прошедшие через образец, воспринимались пьезопреобразователем, аналогичным излучающему, включенному по теневой схеме. Амплитуда принятого ультразвукового сигнала измерялась ламповым вольтметром ВЗ-38. Резонансная частота колебаний фиксировалась частотомером ЧЗ-33. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

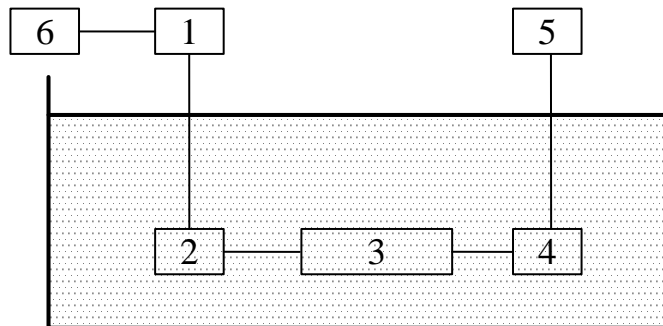


Рис. 1 – Блок-схема экспериментальной установки: 1) генератор сигналов; 2) излучатель ультразвука; 3) образец; 4) приемник ультразвука; 5) вольтметр; 6) частотомер

Результаты акустических измерений коэффициента затухания  $\alpha$  и резонансной частоты  $f$  приведены на рис. 2. На этом же графике приведены результаты испытаний механических свойств образцов: пределов прочности  $\sigma_s$ , текучести  $\sigma_{0.2}$ , относительного удлинения  $\delta$ , выполненных на разрывной машине фирмы «Амслер» при нагрузке 5 т. Как видно из результатов механических испытаний, резкое уменьшение пределов прочности, текучести, а также относительного удлинения наблюдается для сплава Д16 при температурах закалки больше  $530^\circ\text{C}$ , для сплава АК4-1 при температурах закалки более  $565^\circ\text{C}$  и для сплава АК6 при температурах закалки свыше  $570^\circ\text{C}$ . При этих же температурах закалки сплавов наблюдается резкое увеличение коэффициента затухания ультразвука. Для сплава АК6 коэффициент затухания ультразвука резко возрастает уже при температуре закалки  $560^\circ\text{C}$ . Таким образом по измерению коэффициента затухания ультразвука можно надежно выявлять установившуюся стадию пережога и невозможно выявить его начальный период.

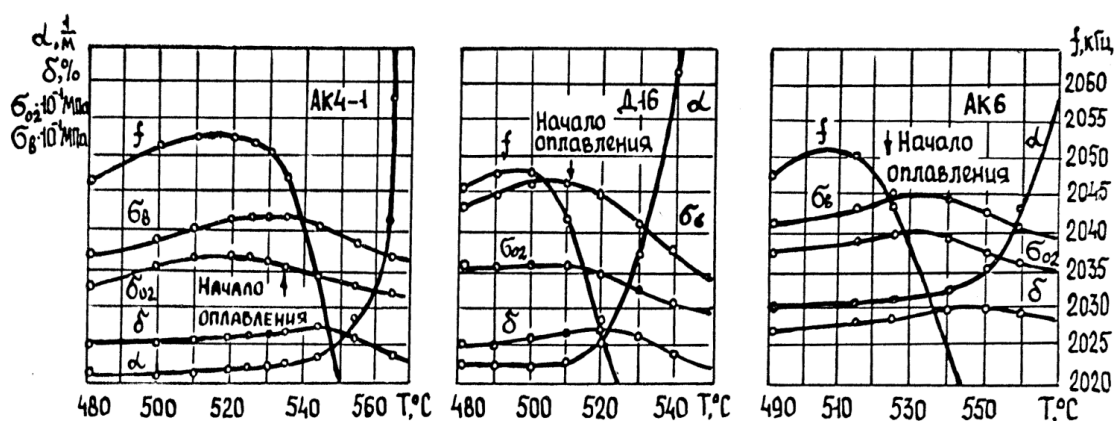


Рис. 2 – Изменение механических и акустических свойств алюминиевых сплавов от температуры закалки

Оплавление в структуре деталей и полуфабрикатов из алюминиевого сплава Д16 начинается при температуре закалки выше  $510^\circ\text{C}$ , из сплава АК4-1 при температуре закалки выше  $535^\circ\text{C}$ , из сплава АК6 – при температуре закалки выше  $525^\circ\text{C}$ .

После проведения ультразвуковых измерений и механических испытаний образцы подвергались металлографическому анализу. Травление образцов для контроля микро-

структуры производилось в реактиве, состоящем из 5 мл  $HNO_3$ , 3 мл  $HCl$ , 4 мл  $HF$ , 190 мл  $H_2O$ . Как показали результаты металлографического анализа (рис. 3, 4) пережог наблюдается для сплава Д16 при температуре закалки выше  $520^\circ C$ , и для сплава АК4-1 при температуре закалки выше  $565^\circ C$  и для сплава АК6 при температуре закалки выше  $550^\circ C$ . Вместе с тем при этих температурах закалки для всех сплавов наблюдается различная степень округления зерен на стыках и неравномерное травление шлифов. Это и принимается за начальную стадию пережога. Недопустимая микроструктура с признаками пережога выявляется при температурах закалки выше указанных на  $10^\circ C$ .

Происходящее при пережоге уменьшение частоты и, соответственно, скорости ультразвуковых колебаний может быть объяснено наличием и возрастанием внутренних напряжений в материале после закалки за счет появления новой фазы выделения водорода.

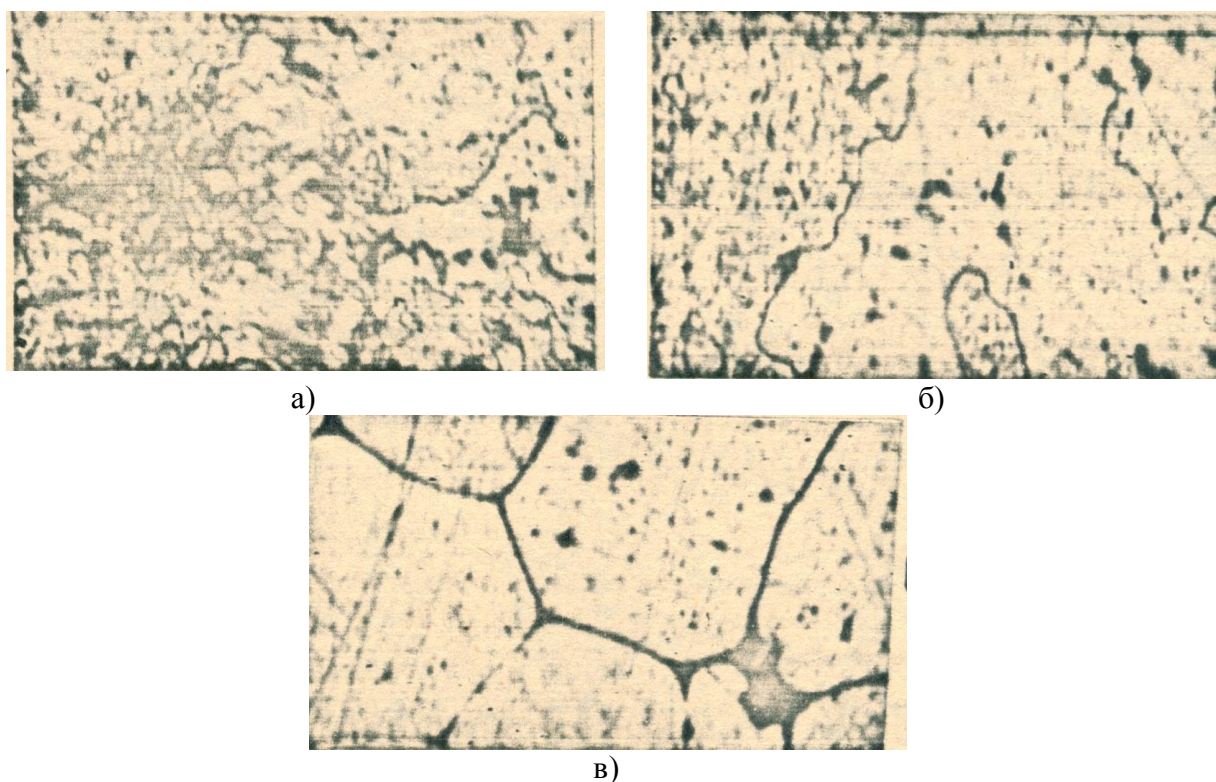


Рис. 3 – Микроструктура образцов из сплава Д16, закаленных при разных температурах: а)  $480^\circ C$  – недогрев (x200); б)  $510^\circ C$  – нормальная закалка (x200); в)  $540^\circ C$  – пережог (x200)

Рост коэффициента затухания при повышении температуры закалки выше допустимой можно объяснить следующим образом. При термической обработке стареющих алюминиевых сплавов температура нагрева под закалку близка к температуре плавления эвтектик, входящих в их состав. При этом обеспечивается полное растворение легирующих элементов в твердом растворе. Поэтому при повышении температуры нагрева под закалку выше нормально допустимой начинается оплавление легкоплавких эвтектик по границам зерен. В начале это проявляется в виде глобулей или скоагулированных включений структурных составляющих, располагающихся внутри и по границам зерен. Далее с ростом температуры нагрева под закалку происходит утолщение границ зерен и постепенное увеличение размеров и количества глобулей. При окончательном пережоге на стыках трех зерен образуются утолщения и проявляется блочная структура.

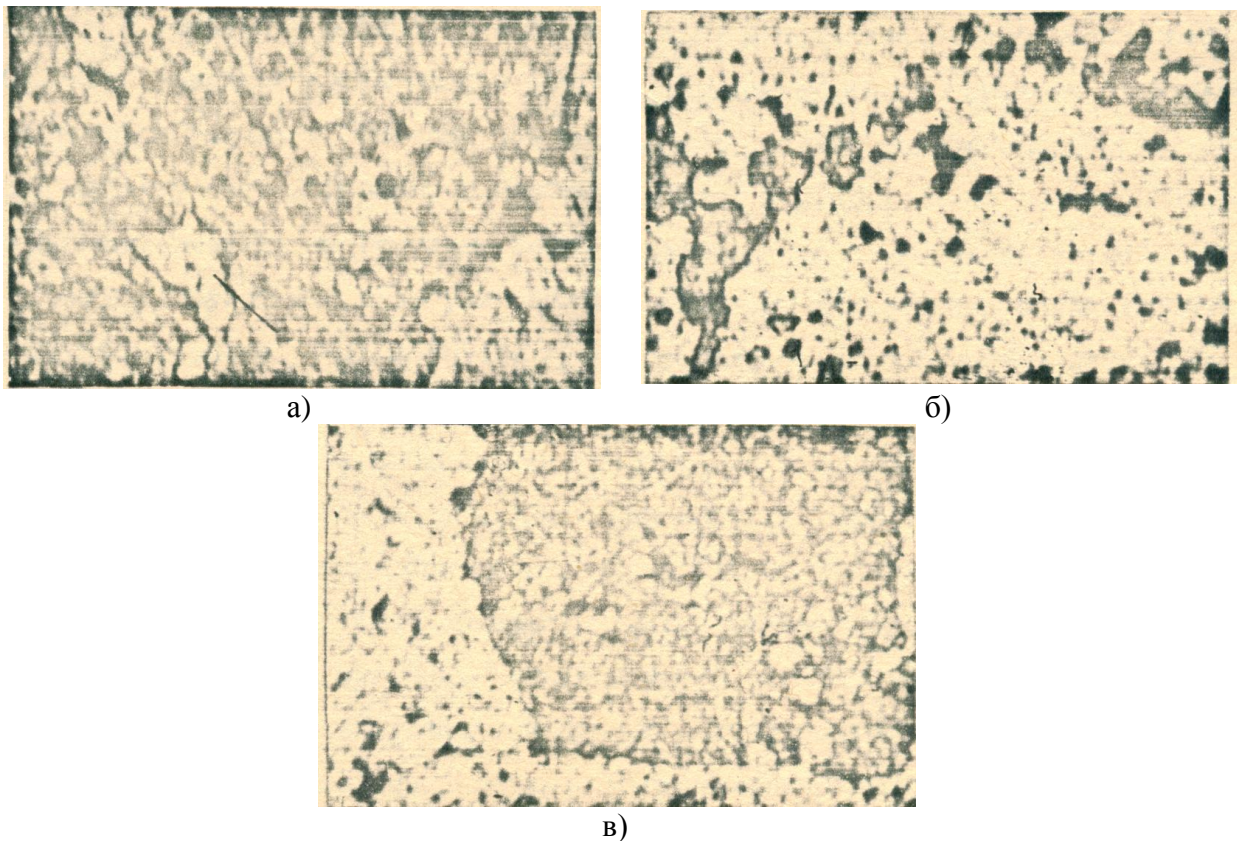


Рис. 4 – Микроструктура образцов из сплава Д1, закаленных при разных температурах: а) 480 °С – недогрев (x200); б) 510 °С – нормальная закалка (x200); в) 540 °С – пережог (x200)

**Выводы.** Появление глобулей и утолщений по границам зерен приводит к увеличению рассеивания ультразвуковых колебаний. Блочная структура сплава делает величину рассеивания более значительной. Соответственно резко возрастает и коэффициент затухания ультразвука.

Таким образом, предлагаемый ультразвуковой контроль пережога деталей и полуфабрикатов из термоупрочняемых алюминиевых сплавов является более эффективным методом по сравнению с механическими испытаниями и металлографическим анализом.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Себко В. В. Вариант автоматизации процесса контроля предела прочности цилиндрических изделий при реализации акустического метода / В. В. Себко, В. Н. Бабенко, В. А. Левенец, Д. С. Иванов // Сб. научн. трудов НТУ «ХПИ», 2013. – № 64.
2. Гуляев А. П. Металловедение : учебник для вузов / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
3. Самокрутов А. А. Применение ЭМА толщиномера А1270 для контроля проката из алюминиевых сплавов / [А. А. Самокрутов, В. Т. Бобров, В. Г. Шевалдыкин, В. Н. Козлов, С. Г. Алёхин, А. В. Жуков] // В мире неразрушающего контроля. – 2002. – № 4. – С. 24-27.
4. Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів : ФМІ ім. Г.В. Карпенка, НАНУ, 2001. – 1134 с.
5. Dixon S., Edwards C., Palmer S. B. Recent developments in the characterisation of aluminium sheets using electromagnetic acoustic transducers (EMATs) // Insignth, 2002, V. 44, No. 5, pp. 274-278.

**Нігалатій В.Д., Погребняк І.Ф., Шарко О.В. ЗАКОНОМІРНОСТІ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ З ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ**

*При проведенні загартування алюмінієвих сплавів може виникнути перепал, що виявляється в зниженні механічних властивостей. Механічні випробування досить трудомісткі. При металографічному аналізі за початкову стадію перепалу приймається різна ступінь округлення зерен, що не завжди відповідає дійсному стану матеріалу. Виконано акустичні вимірювання коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль і резонансної частоти утворення стоячої хвилі. Встановлено, що після вимірювання коефіцієнта згасання можна виявляти сталу стадію перепалу, але не його початковий перехід. Разом з тим, визначити початкову стадію перепалу можна після зменшення резонансної частоти. Пропонований метод є більш ефективним, у порівнянні із механічними випробуваннями і металографічним аналізом, і може бути рекомендований як засіб оцінки технологічних властивостей матеріалів.*

**Ключові слова:** фізико-механічні властивості, алюмінієві сплави, акустичні методи.

**Nigalatiy V.D., Pogrebnyak I.F., Sharko A.V. PATTERNS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES INTERCONNECTION WITH TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ALUMINIUM ALLOYS**

*During tempering of aluminum alloys there may be burnout, which is revealed in the reduction of the mechanical properties. Mechanical testing is quite labor-consuming. During metallographic analysis the initial stage of burnout is adopted as varying degrees of grains rounding; which do not always correspond to the actual condition of the material. Acoustic measurements of attenuation coefficient of ultrasonic waves and the resonant frequency of standing wave formation were done. It was found that through measuring the attenuation coefficient established stage of burnout can be identified, but not its initial transition. However, determination of initial burn-out stage may be possible through reduction of the resonance frequency. The proposed method is more effective than mechanical tests and metallographic analysis and can be recommended as a means of assessing the technological properties of materials.*

**Keywords:** physical and mechanical properties of aluminum alloys, acoustic methods.

© Нігалатій В.Д., Погребняк І.Ф., Шарко О.В.

Статтю прийнято  
до редакції 13.10.14

## ПЕРЕДАВАННЯ ЕНЕРГІЇ ОПОРНО-ПОВОРОТНИМ ПРИБРОЄМ КРАНІВ

*Малащенко В.О., Федик В.В.*

*Національний університет «Львівська політехніка»*

*Виконано аналіз геометрії та кінематики класичних опорно-поворотних пристроїв кранів. На основі виконаного аналізу встановлені причини втрати енергії в цих пристроях від наявності геометричного ковзання. Виконана кількісна оцінка ковзання для опорно-поворотних пристроїв серійних кранів. На основі виконаних досліджень обґрунтовані конструктивні зміни опорно-поворотних пристроїв, що дозволяють зменшити ковзання та знизити за рахунок цього втрати енергії на тертя. Розроблена конструкція опорно-поворотного пристрою, що реалізує запропоновані зміни. На нову конструкцію опорно-поворотного пристрою отримано патент.*

*Ключові слова:* передавання енергії, опорно-поворотні пристрої, крани.

**Вступ.** У підйомно-транспортному машинобудуванні великий обсяг мають крани різноманітних типів, екскаватори тощо [1, 2, 4–6]. До складу таких машин входять достатньо відповідальні опорно-поворотні пристрої, які часто є визначальними їх довговічності. Наприклад, сучасні автокрани часто комплектуються однорядними опорно-поворотними пристроями з перехресною установкою роликів [9, 11]. Традиційно вважається так, що частина роликів, що котяться по нижніх доріжках, сприймає спрямовані вниз навантаження, а частина роликів, що котяться по верхніх бігових доріжках, утримують поворотну платформу від перекидання. Окрім того, роликові кільця сприймають також горизонтальні зусилля, що зрушують поворотну платформу щодо ходової частини, тому немає потреби в застосуванні центральної цапфи для сприймання цих навантажень.

Наприклад, у конструкціях автомобільних кранів, згідно з існуючими стандартами, здебільшого застосовуються роликові опорно-поворотні пристрої, твірна бігової доріжки яких утворює кути 35, 55 і 65° з геометричною віссю обертання поворотної платформи [8, 10]. Такі значення цих кутів нахилу ускладнюють технологію виготовлення бігових доріжок кілець і вінця опорно-поворотного пристрою. Більше того, вимагають виготовлення півобойм різної форми і окремих розмірів. Це спонукало до того, що на ВАТ «Дрогобицький завод автомобільних кранів» розроблено конструкцію роликового однорядного опорно-поворотного пристрою з кутом нахилу 45° твірної бігової доріжки до геометричної осі обертання поворотної платформи кранів, що і викликало необхідність їх досліджень [7].

**Актуальність роботи.** Покращення експлуатаційних показників опорно-поворотного пристрою кранів зі спрощенням технології їх виготовлення та зменшення робочої швидкості ковзання є актуальною задачею підйомно-транспортного машинобудування.

**Метою роботи** є підвищення технічних чинників опорно-поворотних пристроїв кранів, екскаваторів тощо застосуванням модифікованих форм несучих роликів.

**Виклад основного матеріалу.** Розв'язування поставленої задачі проведено аналіз причин втрат енергії внаслідок геометричного тертя між поверхнями бігових доріжок і роликами опорно-поворотного пристрою (ОПП) традиційних і модифікованих конструкцій.

Роликові ОПП, що широко застосовуються в автомобільних кранах, наведено на рис. 1.

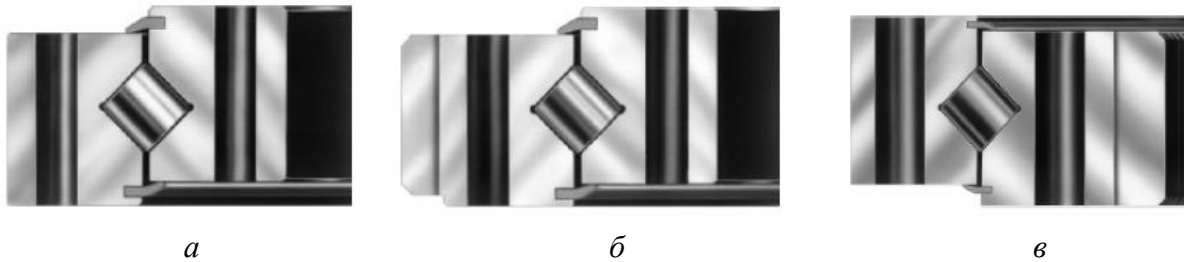


Рис. 1 – Фрагменти стандартних опорно-поворотних пристроїв: *a* – без зубчатого вінця; *б* – з зовнішнім зубчастим вінцем; *в* – з внутрішнім зубчастим вінцем

У конструкціях ОПП (рис. 1) роликів устанавлюються так, що їхні геометричні осі є перпендикулярними у проекції на площину з базовими параметрами, що наведені на рис. 2.

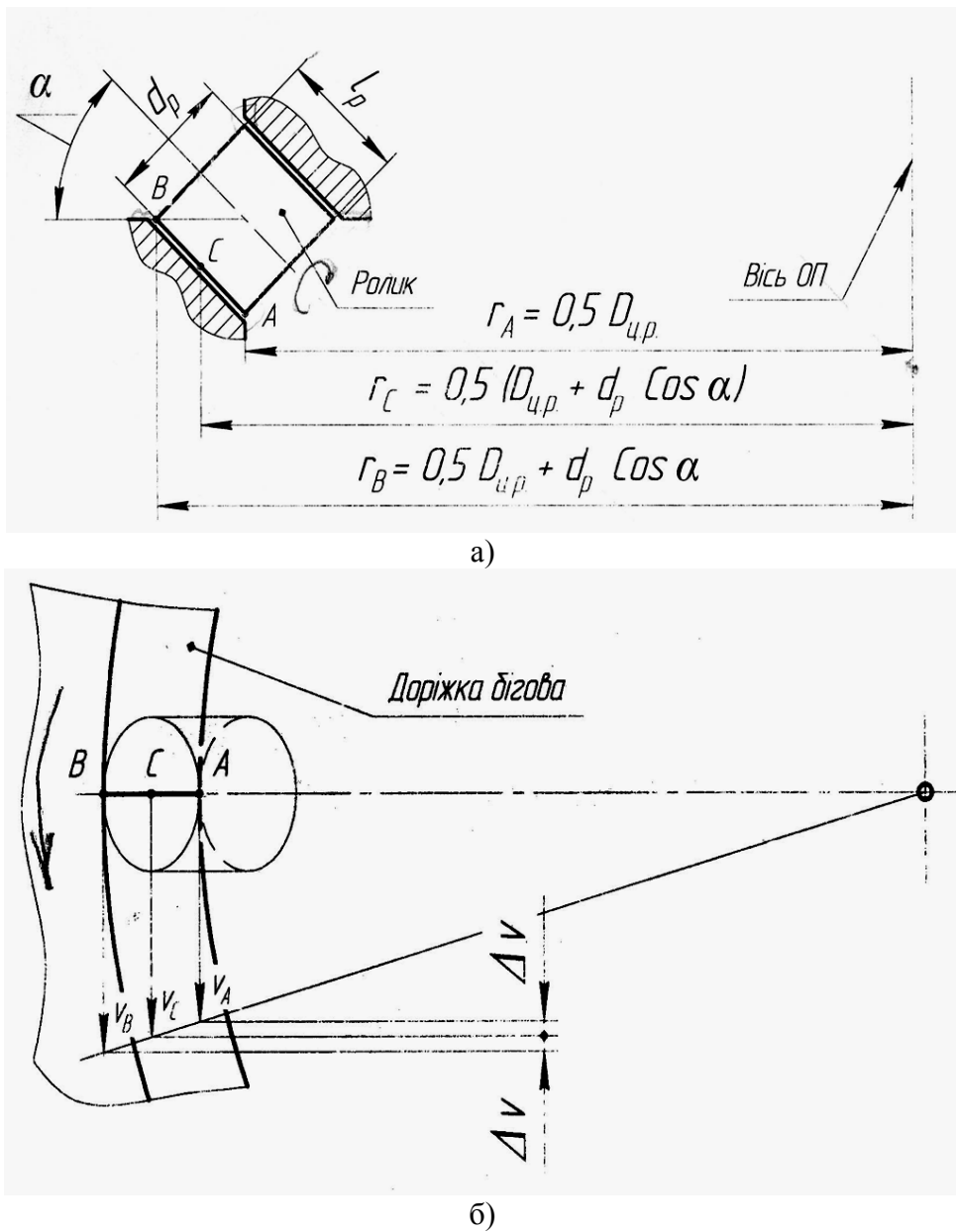


Рис. 2 – Основні параметри верхнього ряду роликів ОПП: а) – геометричні; б) – кінематичні

Із рис. 2а видно наступну геометричну залежність:

$$D_{цр} = \frac{d_p}{\operatorname{tg} \beta} \sqrt{1 + \left( \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sin \alpha} \right)^2}, \quad (1)$$

де  $D_{цр}$  – діаметр кола центрів тіл кочення;  $d_p$  – діаметр роликів;  $\beta = \frac{\pi}{n}$  ( $n$  – кількість тіл кочення) – кутовий крок роликів;  $\alpha$  – кут нахилу твірної поверхні бігової доріжки до геометричної осі повороту опоро-поворотного пристрою.

Після позначення безрозмірних величин одним коефіцієнтом  $K = \sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} + \frac{1}{\sin^2 \alpha}}$ , що залежить від кількості тіл кочення і кута нахилу опорно-поворотного пристрою, рівняння (1) набуває спрощеного вигляду:

$$D_{цр} = k_p d_p. \quad (2)$$

Із рис. 2б визначено величину швидкості ковзання в точці  $B$  як різницю між швидкостями цієї точки, що миттєво належить поверхні бігової доріжки та ролика:

$$v_s = \left( \frac{r_B}{r_c} - 1 \right) v_c, \quad (3)$$

а максимальна величина відносно ковзання дорівнює:

$$\delta_p = \frac{v_B - v_c}{v_c} = \frac{d_p \cos \alpha}{D_{цр} + d_p \cos \alpha}. \quad (4)$$

Кількісний аналіз кінематичних параметрів опорно-поворотних пристроїв проведено для традиційних і запропонованих їх конструкцій. Отримані значення зведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1 – Величини коефіцієнтів пропорційності

Кут нахилу $\alpha$	$\sin^2 \alpha$	$d_p$	$n$	Кутовий крок $\beta$	Коефіцієнт $k_p$
$35^\circ$	0,329	30	133	0,00056	43,5132
$55^\circ$	0,671	30	133	0,00055	42,6632
$60^\circ$	0,750	36	134	0,00056	51,2499
$45^\circ$	0,500	30	134	0,00055	42,6690

Таблиця 2 – Характеристики відносного геометричного ковзання опорно-поворотних пристроїв для автомобільних кранів Дрогобицького заводу автокранів

Марка крана	Діаметр роликів, мм	Кут нахилу, град	Діаметр кола центрів, мм	Відсоток ковзання, %
КС-3575А.17.100	30	35	1280,44	1,88
КС-4574.17.100		45	1280,075	1,63
КТА-16.17.100	36		45	1280,075
КТА-28.01.17.100		1444,918		1,73

Із таблиці видно, що зі зменшенням кута нахилу опорно-поворотного пристрою дещо збільшується геометричне ковзання роликів. Окрім того, на величину геометричного ковзання роликів впливає також їхній діаметр. Наведені в табл. 2 величини відносного геометричного ковзання є дещо меншими від дійсних тому, що не враховується торцеві тертя роликів. Для його врахування розглянуто частину опорно-поворотного пристрою, що наведено на рис. 3, доповнену точками:  $A, B, C, D, E, O$  і  $O_1$ . У точці  $O_1$  торцевого доторкання ролика до поверхні бігової доріжки сусіднього ролика немає. Внаслідок

увігнутості поверхні бігових доріжок сусідніх роликів здійснюється торцеве доторкання на поверхні, що має форму кільця, яке наближено до периферії, до точок  $D$  і  $E$ . Це якраз важливий факт, внаслідок якого мають місце додаткові швидкості ковзання, які пришвидшують спрацювання роликів і зменшують термін роботи всього опорно-поворотного пристрою.

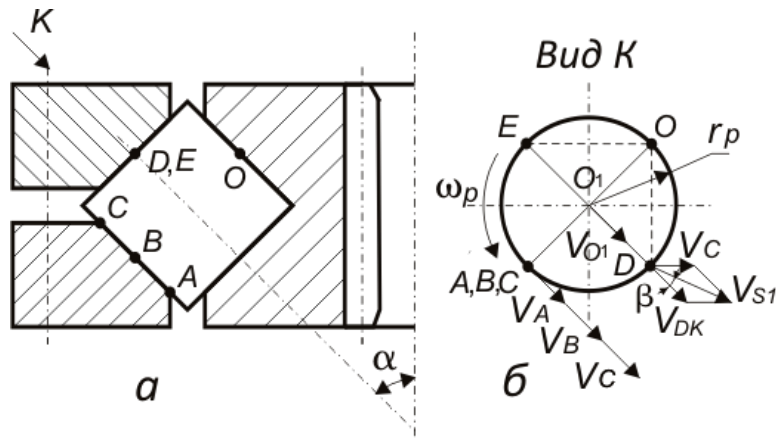


Рис. 3 – Частина конструкції опорно-поворотного пристрою:  $a$  – загальний вигляд;  $b$  – вид  $K$  на зовнішній торець ролика

У разі, коли кут  $\alpha = 45^\circ$ , із рис. 3а видно, що  $V_{DK} = V_B$ , а кутова швидкість руху ролика дорівнює  $\omega_p = V_B / r_p$ , де  $V_{DK}$  – швидкість точки  $D$ , що належить рухомому кільцю;  $r_p$  – радіус ролика.

Знаючи кутову швидкість руху ролика, можна визначити величину абсолютної швидкості точки  $D$ , яка належить ролику:

$$V_{Dp} = \omega_p DO = (V_B / r_p)(r_p \sqrt{2}) = \sqrt{2} V_B, \quad (5)$$

де відстань  $DO = r_p \sqrt{2}$  та решта параметрів видно із рис. 3б.

Сумарна миттєва швидкість точки  $D$ , що належить ролику, визначається за відомою формулою косинусів та дорівнює:

$$V_{s1} = 2,24 V_B. \quad (6)$$

Отриманий вираз (6) переконливо підтверджує попередню констатацію того, що у разі торців роликів плоскої суцільної форми в місцях їхніх доторкань до рухомих бігових доріжок сусідніх роликів виникають суттєві швидкості тертя, які збільшують втрати енергії на тертя ковзання.

Загальну швидкість ковзання ролика відносно власної та сусідньої бігових доріжок можна визначити, порівнюючи рис. 2б і 3б, за формулою:

$$V_3 = \sqrt{V_{s1}^2 + V_s^2 + 2V_{s1}V_s \cos 45^\circ}. \quad (7)$$

Пошук можливостей зменшення впливу цього недоліку підштовхнув авторів до зміни форми торцевих поверхонь роликів.

На основі результатів патентного пошуку розроблено і запропоновано нову конструкцію роликів опорно-поворотного пристрою з модифікованою формою торцевих поверхонь роликів. Розроблена конструкція опорно-поворотного пристрою признана новою та видано патент [7].

Конструктивні особливості запропонованого опорно-поворотного пристрою наведені на рис. 4, де показано: нерухоме кільце 1 з зубчастим вінцем і рухомих півобойм 2 і 3. Ці деталі мають ретельно оброблені поверхні робочих доріжок 4, 5, 6 і 7 прямолінійного профілю, як у традиційних пристроях. У пустотах між біговими

доріжками встановлено циліндричні тіла кочення 8. Ролики відрізняються від традиційних тим, що мають торцеву зовнішню опуклу сферичну поверхню 9 та торцеву внутрішню увігнуту сферичну поверхню 10. Під час роботи ролики, обертаючись навколо власної геометричної осі 11, біжать по відповідних бігових доріжках.

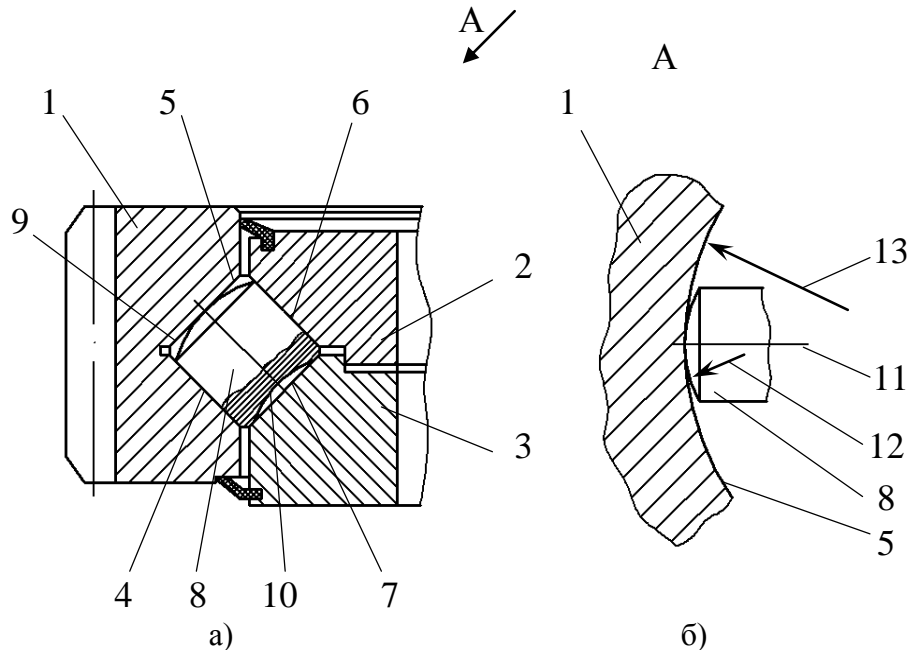


Рис. 4 – Принципова конструкція опорно-поворотного пристрою з модифікованими роликами: а – загальний вигляд лівої частини в перерізі; б – вид у напрямі А (стрілка А) на внутрішню поверхню бігової доріжки у місці дотику ролика

Важливою особливістю форми тіл кочення є також і те, що радіус їхніх увігнутих 10 і опуклих 12 сферичних поверхонь рівні між собою та мають бути меншими за радіус увігнутої зовнішньої поверхні 13 робочих бігових доріжок нерухомого кільця 1.

За розробленою конструкцією нового опорно-поворотного пристрою та попереднього його аналізу можна зробити такі основні **висновки**:

1. Принцип роботи розробленого та запатентованого опорно-поворотного пристрою абсолютно подібний до традиційного, що не вимагає додаткового пояснення.

2. Слід наголосити на тому, що виготовленням внутрішніх торців роликів із заглибленням, можна також отримати зменшення величини геометричного ковзання тіл кочення по внутрішнім біговим доріжкам, які мають опуклі форми.

3. Проведені теоретичні дослідження причин втрат енергії на геометричне тертя є відповідним підґрунтям для подальших удосконалень конструктивних виконань опорно-поворотних пристроїв підйомно-транспортної техніки.

**Напрямки подальших досліджень розроблених опорно-поворотних пристроїв:**

1. Розробка нових конструкцій опорно-поворотного пристрою з покращеними експлуатаційними характеристиками внаслідок зменшення втрат енергії на геометричне тертя.

2. Методи аналізу процесів тертя в нових опорно-поворотних пристроях автокранів.

3. Напружено-деформований стан роликів і поверхонь бігових доріжок кільця опорно-поворотного пристрою в робочій зоні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров М. П. Грузоподъемные машины : учебник для вузов / М. П. Александров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана ; Высшая школа, 2000. – 552 с.
2. Иванченко Ф. К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин / Ф. К. Иванченко. – К. : Вища школа, 1978. – 576 с.

3. НПАОП 0.00–1.01–07 Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів. – К. : Основа, 2007. – 312 с. Гохберг М. М. Справочник по кранам: В 2 т. Т. 2. Характеристики и конст-руктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов. / В. И. Брауде, М. М. Гохберг, И. Е. Звягин и др. ; под общ. ред. М. М. Гохберга.– Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. – 559 с.

6. Вайсон А. А. Крановые грузозахватные устройства : справочник / А. А. Вайсон, А. Ф. Андреев:– М. : Машиностроение, 1982. – 304 с.

7. Маковский А. М. Расчеты крановых механизмов с применением электронных таблиц EXCEL / А. М. Маковский, П. Ф. Лях, И. А. Лукьянов. – Краматорск : Изд-во ДГМА, 2003. – 176 с.

8. Патент № 79333 Україна. Опорно-поворотний пристрій / Малащенко В. О., Гелетій В. М., Федик В. В. Заявник і власник патенту Нац. ун-т «Львівська політехніка». – заявл. 18.07.12; опубл. 25.04.13. – Бюл. № 8. – 6 с.

9. Спиваковский А. О. Транспортирующие машины / А. О. Спиваковский, В. К. Дьячков. – М. : Машиностроение, 1983. – 487 с.

10. Стандартна серія RD 800.

11. Шахмейстер Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев – М. : Машиностроение, 1987. – 336 с.

12. Кузьмин А. В. Справочник по расчётам механизмов подъемно-транспортных машин / А. В. Кузьмин, Ф. Л. Марон – Минск : Высшая школа, 1983. – 350 с.

**Малащенко В.А., Федик В.В. ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫМ УСТРОЙСТВОМ КРАНОВ**

*Выполнен анализ геометрии и кинематики классических опорно-поворотных устройств кранов. На основе выполненного анализа установлены причины потерь энергии в этих устройствах от наличия геометрического скольжения. Выполнена количественная оценка скольжения для опорно-поворотных устройств серийных кранов. На основе выполненных исследований обоснованы конструктивные изменения опорно-поворотных устройств, позволяющие уменьшить скольжение и снизить за счет этого потери на трение. Разработана конструкция опорно-поворотного устройства, реализующая предложенные изменения. На новую конструкцию опорно-поворотных устройств получен патент.*

**Ключевые слова:** передача энергии, опорно-поворотные устройства, краны.

**Malashchenko V.O., Fedyk V.V. ENERGY TRANSFER THROUGH ROTARY SUPPORT DEVICE OF CRANE**

*The analysis of geometry and kinematics of classical rotary support devices of cranes is made. On the basis of the executed analysis the reasons of energy losses in these devices resulting from presence of geometrical slippage are ascertained. The quantitative estimation of slippage for the rotary support devices of serial cranes is executed. Based on executed research there were substantiated constructive changes of the rotary support devices allowing to diminish slippage and to lower at the expense of its friction losses. The construction of the rotary support device implementing offered changes is developed. Patent is acquired for the new construction of rotary support devices.*

**Keywords:** energy transfer, rotary support device, cranes.

© Малащенко В.О., Федик В.В.

Статтю прийнято  
до редакції 15.09.14

УДК 629.5.064

## ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДУ СУДНОВОЇ РУЛЬОВОЇ МАШИНИ З ВАЖІЛЬНОЮ РЕДУКЦІЄЮ

*Овчарук О.М., Проценко В.О.*

*Херсонська державна морська академія*

*У статті розглянуто можливості підвищення експлуатаційних показників рульових машин із приводом від лопатевого гідромотора. Проаналізовані основні недоліки поширених конструкцій рульових машин з лопатевим приводом. Виконане теоретичне дослідження характеристики навантаження на привід рульової машини. На основі виконаних теоретичних досліджень встановлені вимоги до приводу рульової машини підвищеної безвідмовності та простоти. Запропонована конструкція приводу рульової машини з важільною редукцією, що позбавлена багатьох недоліків базового лопатевого приводу. Теоретично обгрунтовані основні параметри пропонованого приводу з важільною редукцією. Доведено, що впровадження запропонованого приводу дозволить спростити гідравлічну систему рульової машини за рахунок застосування гідронасоса сталої подачі та зменшити габарити лопатевого гідромотора.*

**Ключові слова:** *рульова машина, лопатевий гідромотор, рульове перо, редукційний ефект, балер, румпель.*

**Вступ.** У теперішній час, разом із зростанням водотоннажності транспортних суден, зростає і рівень небезпеки при їх аваріях. Особливо гостро стоїть задача підвищення безпечності наливних суден, газозовів та хімовозів. Як показує аналіз аварій транспортних суден, що відбулися в останній час [1], значна частина цих аварій сталася через втрату судном керованості, що, в свою чергу, мало причиною відмову рульової машини. Безвідмовність будь-яких машин є залежною від складності їх конструкції, а поширені сьогодні на суднах конструкції рульових машин є достатньо складними. Відтак, збільшення безвідмовності рульових машин за рахунок спрощення їх конструкції є актуальною задачею сучасного суднового машинознавства.

**Аналіз виконаних досліджень та постановка задачі.** Однією з найбільш поширених конструкцій рульових машин (РМ) на суднах транспортного флоту є рульова машина з лопатевим гідромотором. Цей гідромотор містить лопатевий ротор, що встановлений на балері, та корпус, що встановлений на палубній металоконструкції [1]. Ця конструкція рульової машини поряд із відомими перевагами характеризується кількома недоліками – громіздкістю і складністю, які обумовлюють низку похідних експлуатаційних вад – дороговизну виготовлення і монтажу, складність експлуатації та низьку безвідмовність. Громіздкість описаної конструкції приводу обумовлена тим, що конструкція гідромотора розраховується на максимальне (часто екстремальне) навантаження балера, яке в багато разів більше, ніж мінімальне, і приблизно в три рази більше, ніж середнє (інтегрально усереднене). Складність конструкції описаної рульової машини зумовлена необхідністю частої зміни швидкості обертання ротора при маневруванні судна за принципом: менший момент на балері – більша його кутова швидкість, більший момент – менша швидкість, що дозволяє зменшити установочну потужність приводу РМ. Для такого регулювання у гідропривід описаної рульової машини включені: складний основний насос гідроприводу РМ змінної подачі робочої рідини (радіально- чи аксіально-плунжерного типу) і додатковий допоміжний гідропривід для управління основним насосом з гідравлічним золотниковим посилювачем і слідкуючим золотником. Там, де є така складна система управління із золотником, існує загроза збоєм, наразі – із серйозними наслідками.

З огляду на викладене, **мета даної роботи** – показати можливість зменшення в кілька разів об'єму, маси і ціни основного вузла рульової машини – лопатевого гідромотора, суттєвого спрощення системи його гідроприводу та можливості приводу балера від гідронасоса сталої подачі робочої рідини. При реалізації заявленої мети відкриваються перспективи значного підвищення безвідмовності рульової машини.

Можливості приводу балера від гідронасоса сталої подачі робочої рідини пропонується досягти за рахунок сполучення гідромотора сталої подачі з балером, важливим механізмом такої конструкції, щоб ним було забезпечено потрібний редуційний ефект: при сталій швидкості обертання вала гідромотора досягається потрібна змінна швидкість обертання балера.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

а) дослідити характеристику навантаження на привід рульової машини;

б) запропонувати механізм приводу рульової машини з важливою редуцією та обґрунтувати його параметри.

**Дослідження характеристики навантаження на привід рульової машини.**

Відповідно до [1], момент на балері становить:

$$M_{\sigma} = F_n \times l \times K_{\sigma}, \quad (1)$$

де  $F_n$  – нормальна сила на рульове перо;  $l$  – її плече;  $\hat{E}_a$  – коефіцієнт, що враховує тертя в підшипниках балера.

$$F_n = F \times \frac{\rho \times v^2}{2} \times C_n \times K_K \times K_G, \quad (2)$$

де  $A$  – площа рульового пера;  $\frac{\rho \times v^2}{2}$  – динамічний тиск набігаючої на судно води;  $C_n$  – експериментальний коефіцієнт;  $K_K$  – коефіцієнт впливу корми судна;  $K_G$  – коефіцієнт впливу гвинта.

$$A = b \times h, \quad (3)$$

де  $b$  – ширина рульового пера;  $h$  – його висота.

$$l = b(C_D - K_p), \quad (4)$$

де  $C_D$  – коефіцієнт експериментальний;  $K_p$  – коефіцієнт компенсації (за вибором конструктора).

В розширеному вигляді формула (1) набуває вигляду (5):

$$M_{\sigma} = A \times \frac{\rho \times v^2}{2} \times K_K \times K_G \times C_n b (C_D - K_p) \times K_{\sigma}. \quad (5)$$

Формулу (5) можна скомпонувати з двох характерних частин (6) та (7):

$$W = A \times \frac{\rho \times v^2}{2} \times K_K \times K_{\hat{A}} \times b \times K_a. \quad (6)$$

$W$  – характеризує величину і технічні дані конкретного судна ( $[W] = \text{Н} \times \text{м}$ ).

$$C_M = C_n (C_D - K_1). \quad (7)$$

$C_M$  – характеристика типу рульового пера, подібна, і навіть однакова, для різних суден. Величина  $C_M$  суттєво залежить від кута  $\alpha$  повороту руля. Таким чином, момент на балері судна можна подати так:

$$M_{\sigma} = C_M \times W. \quad (8)$$

В такому випадку, співставляти різні конструкції рульового приводу треба за тим найменшим моментом приводу, з яким вони долають  $M_{\sigma}$  із найбільшим  $C_M$ .

Для конкретного аналізу візьмемо перо з профілем М. Є. Жуковського при  $\lambda = h/b = 1,5$ ,  $K_p = 0,24$ .

За допомогою таблиць коефіцієнтів  $C_n$  і  $C_D$  [3], визначаємо при різних кутах  $\alpha$  коефіцієнт  $C_M$  (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів  $C_M$  для різних значень кута повороту  $\alpha$ 

Позиція	Кут $\alpha, ^\circ$	Обчислення	$C_M$
1	5	0,243(0,225-0,24)	-0,00365
2	10	0,473(0,242-0,24)	0,000946
3	15	0,686(0,26-0,24)	0,0137
4	20	0,886(0,29-0,24)	0,0446
5	25	1,06(0,315-0,24)	0,0795
6	30	1,07(0,34-0,24)	0,107
	33	екстраполяція	0,115
	35	екстраполяція	0,123

Ці данні представлено графіком на рис. 1

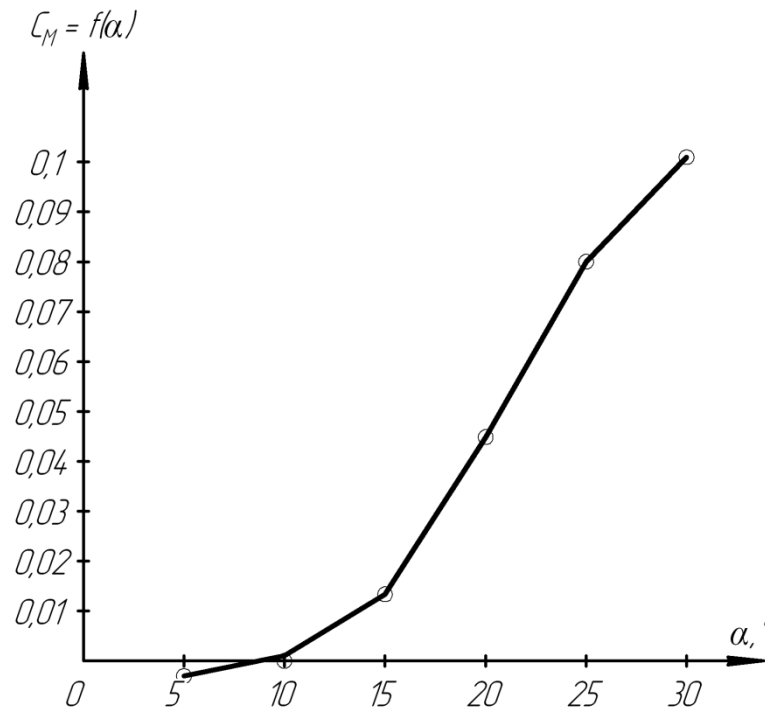


Рис. 1 – Графік зміни коефіцієнта  $C_M$

В якості порівняльного еталона для різних конструкцій рульового приводу візьмемо гідравлічний рульовий привід з регульованою подачею робочої рідини від насосів, що дозволяє максимально зменшити потужність приводу, реалізуючи принцип: чим більший момент на балері, тим меншою задається подача насосів, і збільшується тиск рідини. Задаємо співвідношенням для кутів:

$$\omega = \frac{B}{C_M}, \quad (9)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість балера;  $B$  – константа.

Тоді потужність  $P_i$  приводу у точках  $i = 1, 2, 3, 4$  можна записати формулою (10):

$$P_i = M_i \times \omega_i = B \times W, \quad (10)$$

Шляхом вибору з кількох можливих варіантів [1], побудуємо раціональну форму графіка змін кутової швидкості балера (рис. 2). Графіком передбачене технічне обмеження кутової швидкості рульового пера  $\omega_m = 0,1$  1/с.

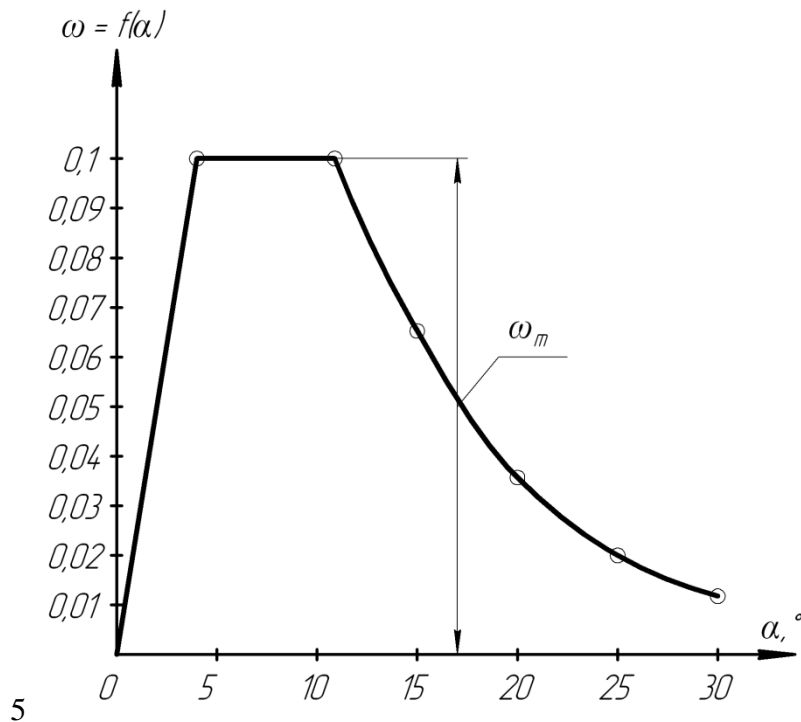


Рис. 2 – Графік зміни кутової швидкості рульового пера

В основу обчислень вихідних даних до графіка на рис. 2 покладено умову: рульове перо повертається із середньої (нейтральної) позиції вбік на кут  $30^\circ$  за певний заданий час  $t_n = 14$  секунд. Цей час складається з часток часу  $\Delta t_i$ , протягом яких рульове перо повертається послідовно на частки кута  $\alpha - \Delta\alpha$  ( $\Delta\alpha = 0,08722$  рад.  $= 5^\circ$ ).

Тобто:

$$t_n = \sum \Delta t_i = \sum \Delta\alpha_i / \omega_i. \quad (11)$$

Тоді з достатньою для практики точністю будемо мати (рис. 2):

$$t_n = \frac{\Delta\alpha}{0,75\omega_m} + \frac{\Delta\alpha}{\omega_m} + \frac{\Delta\alpha}{0,8\omega_m} + \frac{0,5\Delta\alpha}{0,55\omega_m} + \frac{\Delta\alpha}{B/C_{m4}} + \frac{\Delta\alpha}{B/C_{m5}} + \frac{0,5\Delta\alpha}{1,1B/C_{m6}}. \quad (12)$$

Спростуємо вираз (12):

$$\begin{aligned} t_n &= \frac{\Delta\alpha}{\omega_m} \left( \frac{1}{0,75} + 1 + \frac{1}{0,8} + \frac{0,5}{0,55} \right) + \frac{\Delta\alpha}{B} (C_{m4} + C_{m5} + \frac{0,5}{1,1} C_{m6}) = \\ &= \frac{\Delta\alpha}{\omega_m} \times 4,49 + \frac{\Delta\alpha}{B} (0,0446 + 0,0795 + \frac{0,5 \times 0,107}{1,1}) = \\ &= \frac{\Delta\alpha}{\omega_m} \times 4,49 + \frac{\Delta\alpha}{B} \times 0,1727. \end{aligned} \quad (13)$$

Звідси знаходимо величину  $B$ :

$$B = \frac{0,1727\Delta\alpha}{t_n - 4,49\Delta\alpha / \omega_m} = \frac{0,1727 \times 0,08722}{t_n - 4,49 \times 0,8722 / 0,1} = 0,001493 \approx 0,0015. \quad (14)$$

Відповідно до (9), кутові швидкості в позиціях 4, 5, 6 будуть такими:

$$\omega_4 = \frac{0,0015}{0,0446} = 0,0336 \text{ 1/с.}$$

$$\omega_5 = \frac{0,0015}{0,0795} = 0,0189 \text{ 1/с.}$$

$$\omega_6 = \frac{0,0015}{0,107} = 0,0140 \text{ 1/с.}$$

Кутові швидкості балера в усіх вибраних позиціях представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Значення кутових швидкостей в різних позиціях балера

Поз.	1	2	3	4	5	6
Кут $\alpha$ , °	5	10	15	20	25	30
$\omega$ , 1/с.	0,1	0,1	0,064	0,0336	0,0189	0,0140

Графік зростання кута  $\alpha$  в часі побудовано на рис. 3 за даними табл. 3.

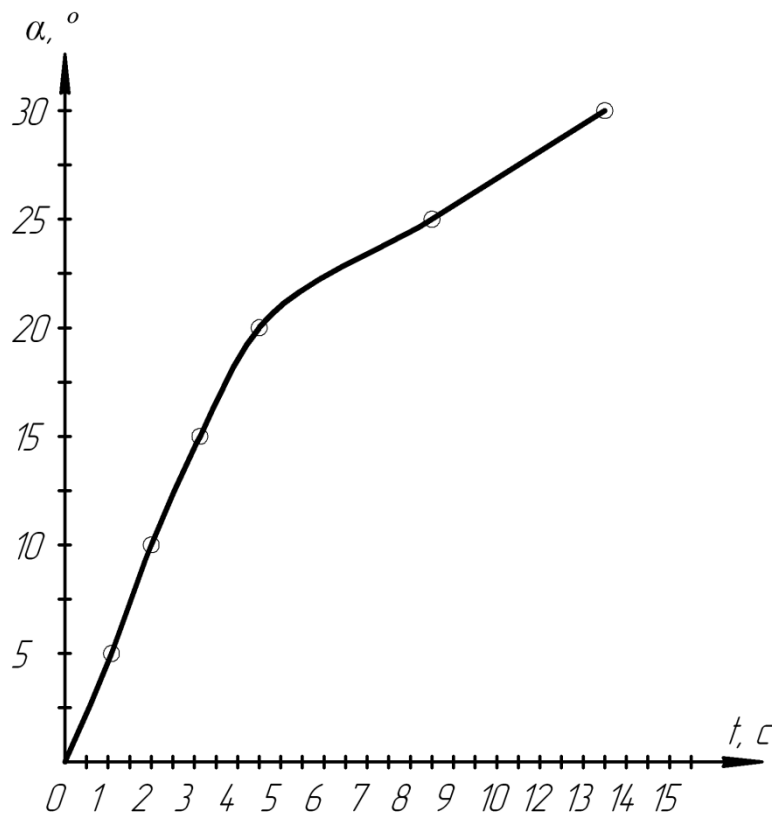


Рис. 3 – Графік зростання кута  $\alpha$  повороту рульового пера

У шостому положенні маємо час  $t_6 = 13,92$  с. замість 14 с., проте така похибка є допустимою при чисельних розрахунках прийнятої точності.

Для контролю показники потужності гідроприводу в основних контрольних точках обчислюємо за формулою (15) і результати заносимо в табл. 4.

$$P_i = C_{.mi} \times \omega_i. \quad (15)$$

Таблиця 3 – Час повороту балера

Кут $\alpha$	Час повороту
$\alpha = 5^\circ$	$t_1 = \Delta t_1 = \frac{\Delta \alpha}{0,75 \omega_m} = \frac{0,08726}{0,75 \times 0,1} = 1,16.$
$\alpha = 10^\circ$	$t_2 = t_1 + \frac{\Delta \alpha}{\omega_m} = 1,16 + \frac{0,08726}{0,1} = 2,03.$
$\alpha = 15^\circ$	$t_3 = t_2 + \frac{\Delta \alpha}{0,82 \omega_m} = 2,03 + \frac{0,08726}{0,82 \times 0,1} = 3,12.$
$\alpha = 20^\circ$	$t_4 = t_3 + \frac{\Delta \alpha}{\omega_{3-4}} = 3,12 + \frac{0,08726}{0,047} = 4,98.$
$\alpha = 25^\circ$	$t_5 = t_4 + \frac{\Delta \alpha}{0,025} = 8,47.$
$\alpha = 30^\circ$	$t_6 = t_5 + \frac{\Delta \alpha}{0,016} = 13,92.$

Таблиця 4 – Значення потужності гідروприводу при різних кутах повороту рульового пера

Кут $\alpha$	$P_i$
$\alpha = 15^\circ$	$P_3 = 0,0137 \times 0,064 = 0,000877$
$\alpha = 20^\circ$	$P_4 = 0,0443 \times 0,0336 = 0,0015$
$\alpha = 25^\circ$	$P_5 = 0,0795 \times 0,0189 = 0,0015$
$\alpha = 30^\circ$	$P_6 = 0,107 \times 0,014 = 0,0015$

### Обґрунтування нового гідроприводу рульової машини з важільною редукцією.

Недоліками найпоширенішого тепер гідроприводу рульового пера з лопатевим гідромотором є:

1. Застосування складних насосів змінної подачі робочої рідини з окремим електроприводом.
2. Застосування складних систем управління вказаними насосами, що включають:
  - електропідсилювач сигналу управління;
  - електромеханічний перетворювач цього сигналу і його гідравлічний підсилювач слідкуючого типу з золотником. За рахунок цього ускладнюється блок управління приводом.
3. Масивність лопатевого гідромотора, розрахованого безпосередньо на максимальний обертальний момент на балері.
4. Недостатня безвідмовність цієї складної системи повороту балера, і її дороговизна.
5. Складність обслуговування такого гідроприводу.

Щоб його спростити і суттєво підвищити надійність рекомендується застосувати додатковий важільний механізм запатентованої конструкції [2], який, завдяки ефекту геометричної редукції, дозволить зменшити в кілька разів момент лопатевого гідромотора, застосувати насоси сталої подачі і прибрати всю складну систему управління насосами.

Конструктивна схема пропонованого механізму зображена на рис. 4.

Основні складові конструкції цього механізму:

- 1) перо руля;
- 2) балер;
- 3) двоплечий румпель;
- 4) шпонка між балером і румпелем;
- 5) опора (платформа) для установки лопатевого гідромотора;
- 6) статор, з'єднаний нерухомо з опорою 5 для розміщення підшипників вала 7;
- 7) вал для двоплечого кривошипа 8 зі шпонкою 9 між ними;
- 8) двоплечий кривошип.

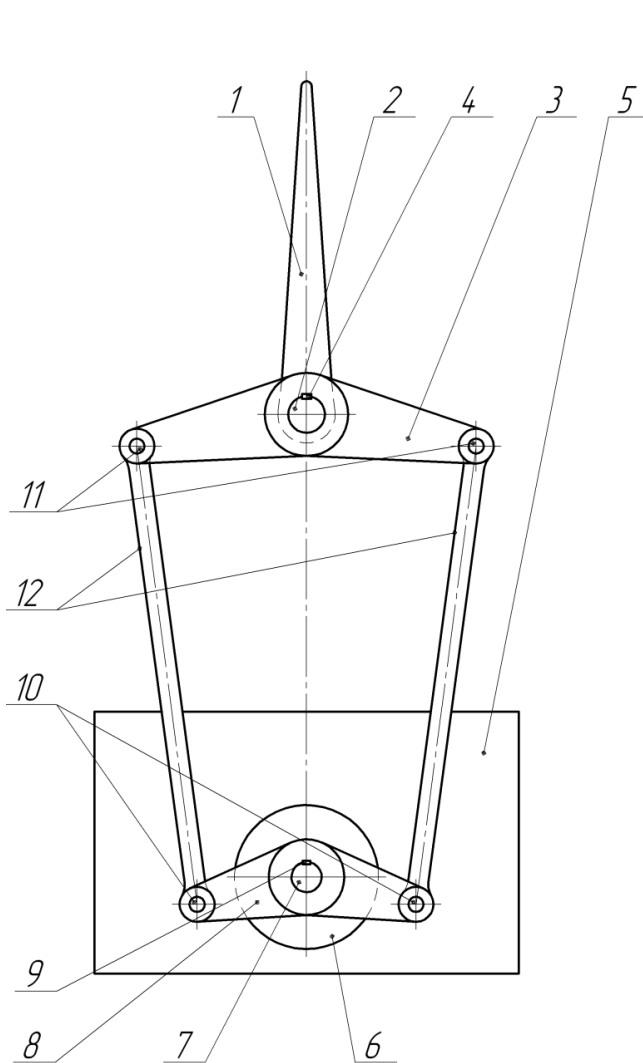


Рис. 4 – Конструктивна схема важільного механізму

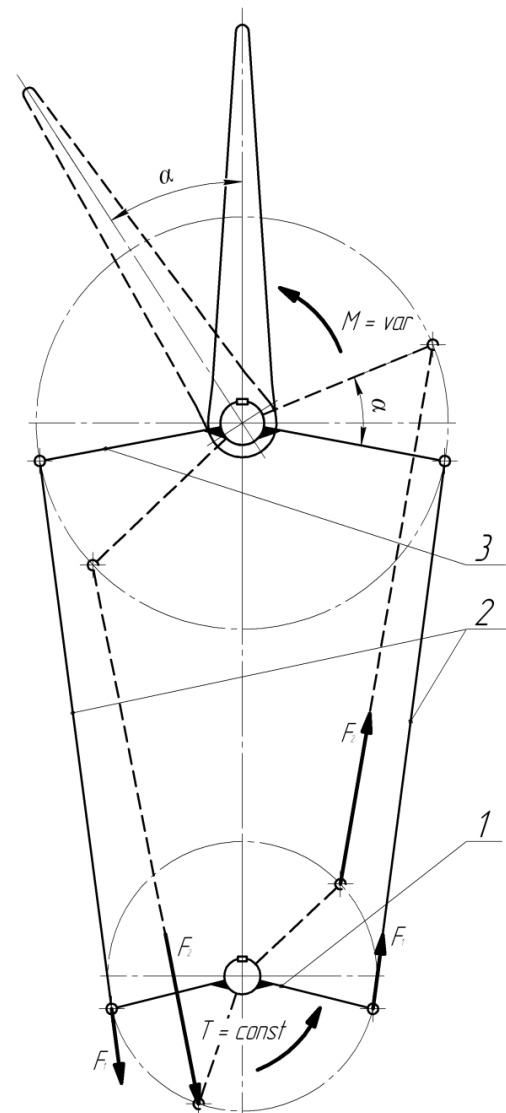


Рис. 5 – Кінематична схема важільного механізму

Кінці румпеля 3 і двоплечого кривошипа 8 з'єднані між собою стрижнями 12 за допомогою циліндричних шарнірів 10 і 11. Лопатевий гідромотор установлюється на опорі 5 і з'єднується своїм валом з валом 7.

Кінематична схема важільного гідроприводу показана на рис. 5, де:

- 1) двоплечний кривошип;
- 2) стрижні – шатуни;
- 3) двоплечний румпель.

Довжина плечей кривошипа суттєво менша, ніж довжина плечей румпеля. Це дає можливість здійснити редуційний ефект між ними. Тобто, при повороті румпеля на кут  $\alpha$ , кривошип повертається на значно більший кут  $\gamma$ . У результаті цього швидкість обертання кривошипа  $\omega_k$  перевищує швидкість обертання румпеля  $\omega_b$  в кілька разів (в залежності від кута  $\alpha$ ).

Маємо передаточне співвідношення  $U$ :

$$U = f(\alpha) = \frac{\omega_k}{\omega_b}. \quad (16)$$



1. Задаємо після кількох наближень радіусом плеча румпеля  $R$  і найбільшим допустимим кутом  $\gamma_n$  повороту кривошипа:

$$R = 100 \text{ (умовних одиниць довжини),}$$

$$\gamma_n = 60^\circ (\beta = 60^\circ).$$

2. Обчислюємо радіус кривошипа  $r$ :

$$X_1 = R \times \sin \alpha_n = 100 \times \sin 30^\circ = 50.$$

$$r = \frac{X_1}{\cos \beta} = \frac{50}{0,866} = 57,74. \quad (19)$$

3. Чисельник рівності (18):

$$Y_1 = f(\alpha) = R \times \cos \alpha. \quad (20)$$

4. Знаменник рівності (18):

$$Y_2 = \sqrt{r^2 - X_1^2}. \quad (21)$$

Дані обчислень за формулами (18)...(21) заносимо в табл. 5.

Таблиця 5 – Значення передаточного відношення важільного механізму у різних позиціях

Позиція	Кут $\alpha$ , °	$X_1$	$Y_1$	$Y_2$	$U$
0	0	0	100	57,74	1,73
1	5	8,71	99,6	57,1	1,744
2	10	17,36	98,5	55,06	1,79
3	15	25,88	96,6	51,6	1,87
4	20	34,2	94,0	46,5	2,02
5	25	42,26	90,63	39,34	2,3
6	30	50	86,6	28,87	3,0
7	33	54,46	83,87	19,17	4,37
8	35	57,36	81,91	6,58	12,4

Кутові швидкості балера по позиціях визначимо за формулою:

$$\omega_i = \frac{E}{U_i}, \quad (22)$$

де  $E$  – константа, що має сенс сталої швидкості лопатевого гідромотора, щоб визначити  $E$ , скористаємось умовою, що балер повинен повернутися на кут  $\alpha = 30^\circ$  за 14 сек.

$$14 = \sum \Delta t_i = \sum \frac{\Delta \alpha_i}{\omega_i} = \sum \frac{\Delta \alpha_i U_i}{E}. \quad (23)$$

Щоб спростити розрахунки, визначимо величину  $E$  спочатку в градусах за секунду, потім переведемо в радіани за секунду. Прийmemo, що  $\Delta \alpha = 5$  градусів.

Прийmemo далі, що початкова фаза повороту балера (розгін) на  $0,5\Delta \alpha$  відбувається за рахунок введення в дію гідросистеми при вже працюючому насосі приблизно за

1 секунду при середній швидкості балера  $\omega_0 = \frac{0,6E}{U_0}$ .

Тоді матимемо:

$$14 = \frac{0,5 \times \Delta\alpha}{0,6 \times E} \times U_0 + \frac{\Delta\alpha}{E} \times (U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + 0,5 \times U_6) =$$

$$= \frac{\Delta\alpha}{E} \times \left( \frac{0,5}{0,6} \times 1,73 + 1,744 + 1,79 + 1,87 + 2,02 + 2,3 + 0,5 \times 3,0 \right) \quad (24)$$

$$14 = \frac{5}{E} \times 12,66, \quad (25)$$

звідки:

$$E = \frac{5 \times 12,66}{14} = 4,52 \text{ рад/с} = (0,079 \text{ рад/с}). \quad (26)$$

Матимемо такі кутові швидкості балера по точках ( $E/U_i$ ), і показники моменту  $\Pi_{mi}$ , і потужності  $\Pi_{pi}$  в них:

$$\Pi_{mi} = \frac{C_{mi}}{U_i}, \quad (27)$$

$$\Pi_{pi} = \frac{C_{mi}}{\omega_i}. \quad (28)$$

Таблиця 6 – Значення показників моменту  $\Pi_{mi}$  і потужності  $\Pi_{pi}$  в різних позиціях

$\alpha_i$	10 °	15 °	20 °	25 °	30 °
$\omega_i$	0,044	0,042	0,039	0,034	0,026
$\Pi_{pi} / 10^{-3}$	0,045	0,578	1,74	2,73	2,81
$\Pi_{mi} / 10^{-3}$	0,528	7,33	22,1	34,6	35,7

Порівняємо найбільші потрібні потужності гідроприводів у позиції 6 при  $\alpha = 30^\circ$ :

- базового, регульованого гідравлічно –  $P_m = \Pi_6 \times W = 0,0015W$ ;
- пропонованого важільного –  $P_m = \Pi_{p6} \times W = 0,00281W$ .

Потрібна найбільша потужність важільного більша регульованого в  $N$  разів:

$$N = \frac{0,00281}{0,00150} = 1,88. \quad (29)$$

Однак, найбільша потужність регульованого приводу діє в широкому (практично, на всьому) діапазоні кутів  $\alpha$  повороту балера, а в важільному приводі – тільки в одній точці (при  $\alpha = 30^\circ$ ).

Отже, за нормами ІМО, в важільному варіанті можна допустити короткочасне перевантаження електродвигуна в 1,5 рази. Це означає, що визначене перебільшення двох потужностей  $N$  зменшиться і становитиме величину  $n_1$ :

$$n_1 = \frac{N}{1,5} = 1,25. \quad (30)$$

Тобто, установочна потужність важільного гідроприводу повинна бути на 25 % більшою, ніж регульованого.

Оцінимо тепер докладніше техніко-економічний ефект від впровадження нового важільного приводу. З досвіду і виконаних розрахунків відомо, що найбільше експлуатаційне навантаження на гідропривід виникає при куті повороту балера  $\alpha = 30^\circ$ . У цій позиції передаточне відношення важільної системи дорівнює трьом ( $u = 3$ , табл. 5). Це означає, що момент на лопатевому гідромоторі, порівняно з базовим варіантом, зменшиться у три рази. Звідси, за принципом подібності однотипних механізмів,

впливає, що об'єм і маса основного елемента – лопатевого гідромотора – зменшиться в три рази, лінійні величини (зокрема висота – в  $3^{1/3} = 1,44$  рази, зайнята в плані площа – у  $3^{2/3} = 2,1$  рази. Вартість лопатевого гідромотора зменшиться також не менше, ніж в три рази. Крім того, зменшиться вартість його технічного обслуговування та ремонту.

Очевидно також, що вартість виготовлення двоплечевого кривошипа і двох шатунів з чотирма циліндричними шарнірами менша, ніж вартість приводу регулювання подачі основного насоса та слідкувальної системи.

### Висновки

1. Запропонована і обґрунтована нова конструкція важільного приводу руля рульової машини морського судна від лопатевого гідромотора, в якій гідромотор встановлений збоку паралельно до осі балера. При цьому двоплечий кривошип гідромотора сполучений з двоплечим румпелем так, що досягається позитивний редуційний ефект: при сталій швидкості обертання ротора гідромотора реалізується потрібна зміна кутової швидкості балера (при меншій моменті на балері його швидкість обертання більша, і навпаки, при більшому моменті – швидкість обертання менша).

2. Така конструкція приводу рульової машини дозволяє приблизно у три рази зменшити його об'єм, масу і вартість.

3. Запропонована конструкція дозволяє відмовитись від застосування насоса змінної подачі з усією складною та менш надійною системою управління нею та замінити їх насосом сталої подачі.

4. Підшипники балера у запропонованому варіанті стануть більш доступними для технічного обслуговування.

5. Запропонована конструкція потребує збільшення установочної потужності електродвигуна на 25 %.

Напрямки подальших досліджень:

1. Геометричний та силовий синтез запропонованого важільного механізму рульової машини.

2. Динаміка запропонованого важільного приводу рульової машини.

3. Критерії працездатності основних деталей запропонованого механізму.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Харин В. М. Судовые гидравлические рулевые машины / В. М. Харин. – Одесса : Феникс, 2005. – 280 с.

2. Патент на корисну модель МПК В63Н 1/02, № 85449. Рульова машина. Патентовласник Херсонська державна морська академія ; авт.: Овчарук О. М., Проценко В. О. – u2013 03983; заявл. 01.04.2013 ; опубл. 25.11.2013, Бюл. № 22.

3. Чиняев И. А. Судовые вспомогательные механизмы / И. А. Чиняев. – М. : Транспорт, 1982. – 295 с.

#### **Овчарук А.М., Проценко В.А. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА СУДОВОЙ РУЛЕВОЙ МАШИНЫ С РЫЧАЖНОЙ РЕДУКЦИЕЙ**

*В статье рассмотрены возможности повышения эксплуатационных показателей рулевых машин с приводом от лопастного гидромотора. Проанализированы основные недостатки распространенных конструкций рулевых машин с лопастным приводом. Выполнено теоретическое исследование характеристики нагрузки на привод рулевой машины. На основе выполненных теоретических исследований установлены требования к приводу рулевой машины повышенной безотказности и простоты. Предложена конструкция привода рулевой машины с рычажной редукцией, лишенная многих недостатков базового лопастного привода. Теоретически обоснованы основные параметры предложенного привода с рычажной редукцией. Доказано, что внедрение предложенного привода позволит упростить гидравлическую систему рулевой машины за счет применения гидронасоса постоянной подачи и уменьшить габариты лопастного гидромотора.*

**Ключевые слова:** рулевая машина, лопастной гидромотор, рулевое перо, редуцирующий эффект, баллер, румпель.

**Ovcharuk O.M., Protsenko V.O. RATIONALE DRIVE PARAMETERS OF SHIP STEERING GEAR WITH A LEVER REDUCTION**

*The article discusses the possibility of increasing operational performance steering gears driven by vane actuator. The main shortcomings of common structures of the vane steering gears drive are analyzed. The theoretical study of the characteristics of the load on the steering-wheel drive car is given. On the base of theoretical researches requirements to drive the steering apparatus of high reliability and simplicity are established. The design of the steering apparatus drive with lever reduction, devoid of many of the shortcomings of the base of the vane actuator. The basic parameters of the proposed actuator lever reduction are theoretically proved. It is proved that the proposed introduction of the drive will simplify hydraulic steering gear pump through the use of a constant supply and reduce the size of the vane actuator.*

**Keywords:** steering gear, vane actuator, steering pen, reducing effect, baler, tiller.

© Овчарук О.М., Проценко В.О.

Статтю прийнято  
до редакції 7.11.14.

## ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНИХ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ НАНОТРУБКАМИ

*Сапронов О.О., Рожков О.С., Леценко О.В.*

*Херсонська державна морська академія,*

*Голотенко О.С.*

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

*Досліджено вплив вмісту нанодисперсного наповнювача на адгезійні і фізико-механічні властивості захисних покриттів. Встановлено, що підвищення адгезійних характеристик матеріалів зумовлено перебігом фізико-хімічних процесів при його структуроутворенні, що активуються під впливом попередньої ультразвукової обробки. Обґрунтовано, що використання ультразвукової обробки дозволяє вирішити проблему рівномірного розподілу наночасток за об'ємом і водночас поліпшити властивості композитів.*

*Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних композитів вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20, що характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах.*

*Доведено, що оптимальний вміст нанотрубок у зв'язувачі складає  $q = 0,050$  мас.ч., що зумовлює формування ізотропного адгезійного матеріалу. Доведено, що оптимальний вміст нанотрубок у зв'язувачі складає  $q = 0,075$  мас.ч. при формуванні матеріалу з поліпшеними фізико-механічними властивостями.*

*Ключові слова:* нанотрубки, нанокомпозитний матеріал, адгезійні і фізико-механічні властивості.

**Постановка проблеми.** Один із шляхів отримання епоксикомпозитів з підвищеними експлуатаційними характеристиками – оптимізація технології їх формування і наповнення матриці різними за хімічною природою, складом і розміром добавок. Водночас на сьогодні перспективним є використання вуглецевих наноструктур, що відзначаються поліпшеними механічними та теплофізичними властивостями. Серед відомої гама нанодисперсних наповнювачів (ультрадисперсний алмаз, фулерени, нанографіт та ін.) широко використовують нанотрубки (НТ). Нанотрубки характеризуються поліпшеними адсорбційними властивостями, що дозволяє покращувати характеристики композитів навіть під час введення часток за незначного вмісту. Проте, основна проблема під час введення нанотрубок у зв'язувач – формування у структурі композитів агломератів введених добавок. Серед методів, які використовують для попередження агломерації компонентів, є попередня ультразвукова обробка (УЗО) композицій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням властивостей композитних матеріалів (КМ) займається багато іноземних та українських вчених і науковців. При цьому значних успіхів у дослідженні впливу ультразвукової обробки на властивості полімерних композитів досягнули Трофімов Н. Н., Москалев Е. В., Нізіна Т. А., Стухляк П. Д., Чихіра І. В. та ін. [1–4], що дозволяє проаналізувати перспективи впливу даного енергетично поля для диспергування епоксидних композицій з наночастками. Слід зазначити, що використання УЗО дозволяє вирішити проблему рівномірного розподілу наночасток за об'ємом і водночас поліпшити властивості композитів [1]. При цьому важливою є оптимізація режимів УЗО, які детально описано у працях [2–4].

**Мета роботи** – дослідити вплив вмісту нанотрубок на механічні властивості епоксикомпозитних матеріалів.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною

міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо [2], що ПЕПА – низькомолекулярна речовина, що має наступну хімічну формулу:  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ . Зшивали КМ, вводючи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювач для експериментальних досліджень використано НТ з дисперсністю 5 нм. При цьому епоксидні КМ, наповнені НТ, формували за технологією, описаною в працях [2, 3], що передбачає використання ультразвукового диспергування композицій і виконання наперед заданого температурно-часового режиму затвердіння.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійна міцність при відриві і зсуві, залишкові напруження, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно з ГОСТ 14760-69. Дослідження адгезії при зсуві проводили згідно з ГОСТ 14759-69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань сталених зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  Н/с. Діаметр робочої частини сталених зразків при відриві становив –  $d = 25$  мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [5]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3 \dots 0,5$  мм формували на сталевій основі. Параметри основи: загальна довжина –  $l = 100$  мм; робоча довжина –  $l_0 = 80$  мм, товщина –  $\delta = 0,3$  мм. Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно з ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина  $l = 120 \pm 2$  мм, ширина  $b = 15 \pm 0,5$  мм, висота  $h = 10 \pm 0,5$  мм.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Дослідження проводили у два етапи. На початковому етапі досліджували вплив вмісту НТ на адгезійну міцність при відриві ( $\sigma_a$ ), зсуві ( $\tau$ ) і залишкові напруження ( $\sigma_3$ ) у нанокompозитних матеріалах (НКМ).

Експериментально встановлено [2, 3], що адгезійна міцність модифікованої УЗО епоксидної матриці становить  $\sigma_a = 24,4$  МПа. Введення у епоксидний олігомер часток НТ за вмісту  $q = 0,010 \dots 0,025$  мас.ч. призводить до підвищення показників адгезійної міцності при відриві НКМ до  $\sigma_a = 34,8 \dots 48,3$  МПа (рис. 1, крива 1), що характерно для початкової взаємодії активних центрів наповнювача з гідроксильними та епоксидними групами зв'язувача. Збільшення вмісту добавки до  $q = 0,050$  мас.ч. призводить до появи максимуму на кривій залежності адгезійної міцності НКМ від вмісту НТ. При цьому, адгезійна міцність НКМ становить  $\sigma_a = 56,9$  МПа. Вважали, підвищення адгезійних характеристик НКМ за такого вмісту НТ зумовлено перебігом фізико-хімічних процесів, які значною мірою посилюються при впливі УЗО. При цьому сегменти епоксидного олігомеру активуються до міжфазової взаємодії з активними центрами наповнювача, що під час подальшого зшивання забезпечує упорядкованість їх структури.

Водночас слід зазначити, що збільшення вмісту наночасток до  $q = 0,075 \dots 0,500$  мас.ч. призводить до незначного зменшення адгезійної міцності НКМ до металевої основи. Доведено (рис. 1), що за такого наповнення адгезійна міцність матеріалів становить  $\sigma_a = 48,7 \dots 53,6$  МПа. Тому варто відмітити, що наповнення композитів нанотрубками за вмістом понад  $q = 0,050$  мас.ч. з умовою використання матеріалу як адгезиву не рентабельно з економічного і практичного поглядів. Отримані результати можна пояснити формуванням концентраторів напружень, які виникають при перенасиченні НТ, що супроводжується підвищенням в'язкості системи. За рахунок цього формується адгезив з більш жорсткою структурою. Враховуючи при цьому товщину адгезиву ( $\delta = 80 \dots 100$  мкм), можна стверджувати, що цей фактор негативно впливає на експлуатаційні характеристики розроблених матеріалів.

Надалі, під час аналізу результатів дослідження впливу вмісту НТ на адгезійну міцність при зсуві НКМ (рис.1, крива 2) спостерігали подібну тенденцію. Доведено, що при введенні наночастинок за вмісту  $q = 0,010 \dots 0,025$  мас.ч. адгезійна міцність НКМ підвищується відносно обробленої УЗО матриці ( $\tau = 9,0$  МПа) і становить  $\tau = 9,8 \dots 10,5$  МПа. Збільшення вмісту добавки до  $q = 0,050$  мас.ч. призводить до появи максимуму на кривій залежності адгезійної міцності від кількості НТ ( $\tau = 11,3$  МПа). При введенні НТ за вмісту  $q = 0,075$  мас.ч. значення дотичних напружень знаходяться в межах  $\tau = 11,1$  МПа. При введенні наночастинок за вмісту  $q = 0,100 \dots 0,500$  мас.ч. встановлено незначне зниження величини дотичних напружень  $\tau = 10,9 \dots 11,0$  МПа.

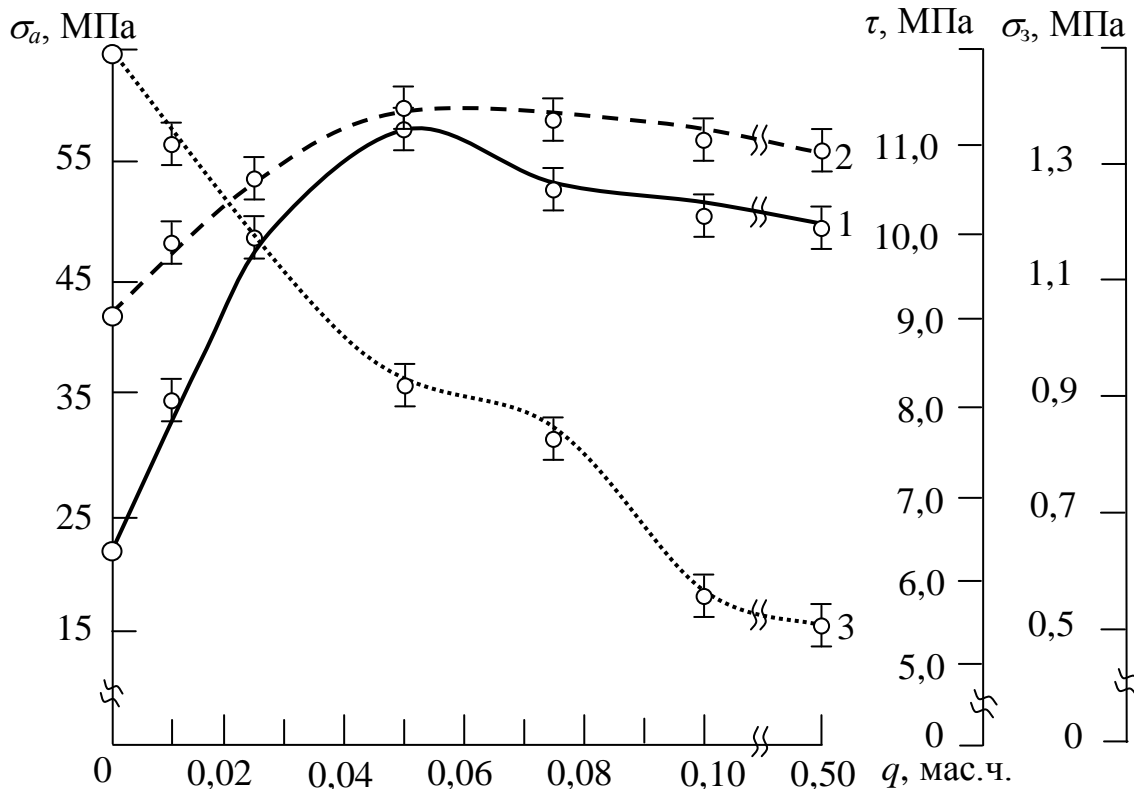


Рис. 1 – Залежність адгезійних властивостей і залишкових напружень у НКМ від вмісту НТ:  
 1 – адгезійна міцність при відриві ( $\sigma_a$ ); 2 – адгезійна міцність при зсуві ( $\tau$ ); 3 – залишкові напруження ( $\sigma_3$ )

У процесі експериментальних досліджень виявлено, що крива залежності адгезійної міцності при зсуві корелює з динамікою адгезійних властивостей НКМ при відриві, залежно від вмісту НТ. Особливу увагу слід звернути на те, що за вмісту наночастинок  $q = 0,050$  мас.ч. встановлено максимальні значення адгезійної міцності при відриві ( $\sigma_a$ ) і зсуві ( $\tau$ ). Отримані результати дослідження дозволяють констатувати, що наповнення зв'язувача частками НТ за оптимального вмісту ( $q = 0,050$  мас.ч.) зумовлює формування ізотропної епоксидної системи. Такі адгезиви доцільно використовувати як захисні покриття на довговимірні поверхні складного профілю, а також як матеріал для відновлення поверхонь різного функціонального призначення.

Експериментально встановлено [2, 3], що значення залишкових напружень обробленої ультразвуком епоксидної матриці складає  $\sigma_3 = 1,4$  МПа (рис. 1, крива 3). При введенні НТ за вмісту  $q = 0,010 \dots 0,025$  мас.ч. залишкові напруження зменшуються і становлять  $\sigma_3 = 1,2 \dots 1,3$  МПа. Введення НТ за вмісту  $q = 0,050$  мас.ч. забезпечує формування матеріалу із залишковими напруженнями  $\sigma_3 = 0,9$  МПа. Надалі збільшення вмісту НТ до  $q = 0,075 \dots 0,500$  мас.ч. зумовлює монотонне зниження залишкових напружень у НКМ. Отримані результати і порівняльний аналіз залежності адгезійної міцності та залишкових напружень у НКМ від вмісту НТ свідчать про складний механізм

перебігу фізико-хімічних процесів під час полімеризації матеріалів та релаксаційних процесів при подальшій експлуатації розроблених композитів.

На наступному етапі досліджено вплив вмісту НТ на модуль пружності при згинанні ( $E$ ) і руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ ) НКМ. Попередньо встановлено [2, 3], що модуль пружності епоксидної матриці становить  $E = 2,9$  ГПа, а руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{32} = 48,0$  МПа.

Аналіз кривої залежності модуля пружності при згинанні від вмісту НТ (рис. 2, крива 1) дозволяє стверджувати, що введення добавки за вмісту  $q = 0,010 \dots 0,050$  мас.ч. сприяє підвищенню показників міцності композитів до  $E = 3,00 \dots 3,23$  ГПа. Надалі збільшення вмісту наночастинок до  $q = 0,075 \dots 0,500$  мас.ч. зумовлює формуванню матеріалу із значенням модуля пружності при згинанні  $E = 3,25 \dots 3,30$  ГПа. При цьому слід зауважити, що доцільним є використання матеріалу із вмістом НТ  $q = 0,075$  мас.ч., позаяк показники модуля пружності такого НКМ є максимально високими.

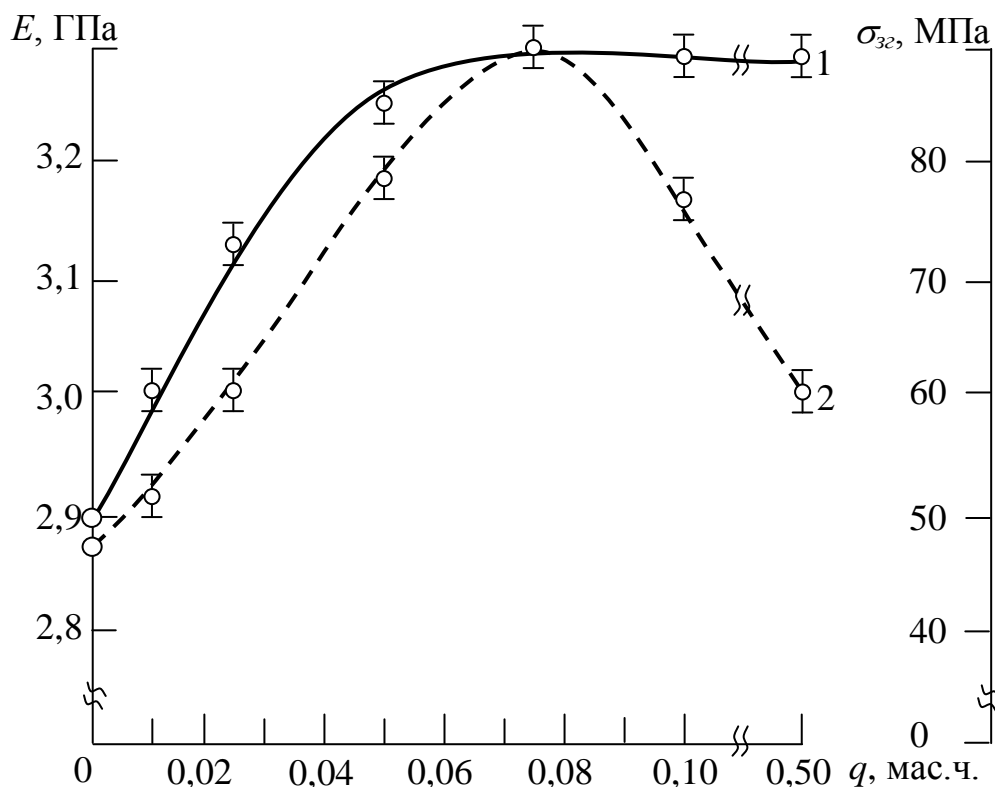


Рис. 2 – Залежність модуля пружності при згинанні ( $E$ ) і руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32}$ ) НКМ від вмісту НТ: 1 – модуль пружності при згинанні ( $E$ ); 2 – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ )

Додатково встановлено збільшення руйнівних напружень при згинанні НКМ до  $\sigma_{32} = 51,0 \dots 79,0$  МПа відносно матриці, яке спостерігали при введенні НТ за вмісту  $q = 0,01 \dots 0,050$  мас.ч. (рис. 2, крива 2). Вважали, що це зумовлено рівномірним розподілом часток в об'ємі епоксидного зв'язувача, а також інтенсивним перебігом фізико-хімічних процесів взаємодії на межі поділу фаз «полімер – нанонаповнювач». Збільшення вмісту добавки до  $q = 0,075$  мас.ч. призводить до утворення сіткової структури НКМ (внаслідок значної хімічної міжфазової взаємодії) і появи максимуму на кривій залежності руйнівних напружень при згинанні від вмісту НТ. При цьому руйнівні напруження при згинанні НКМ становлять  $\sigma_{32} = 89,6$  МПа. Надалі введення наночастинок за вмісту  $q = 0,100 \dots 0,500$  мас.ч. призводить до зменшення руйнівних напружень при згинанні НКМ до  $\sigma_{32} = 60,0 \dots 76,3$  МПа.

**Висновки.** За результатами проведених адгезійних і фізико-механічних досліджень композитних епоксидних матеріалів, встановлено оптимальний вміст нанотрубок (5 нм) для формування захисних покриттів з поліпшеними властивостями.

Аналіз результатів дослідження адгезійних властивостей епоксикомпозитів дозволяє стверджувати, що максимальними показниками адгезійної міцності відзначаються матеріали із вмістом нанотрубок  $q = 0,050$  мас.ч. За такого наповнення адгезійна міцність композитів при відриві становить  $\sigma_a = 56,9$  МПа, при зсуві –  $\tau = 11,3$  МПа, а залишкові напруження –  $\sigma_z = 0,9$  МПа.

Встановлено оптимальний вміст нанонаповнювача для формування композитів з поліпшеними фізико-механічними властивостями. Доведено, що введення нанотрубок за критичного вмісту  $q = 0,075$  мас.ч. зумовлює формування нанокомпозитів з такими властивостями: модуль пружності при згинанні –  $E = 3,3$  ГПа, руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{z2} = 89,6$  МПа.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Трофимов Н. Н. Применение ультразвука в технологии создания адгезионных соединений / Н. Н. Трофимов, С. И. Пугачев. – Л. : ЛДНТП, 1979. – 20 с.
2. Buketov A. V. Influence of the ultrasonic treatment on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites / A. V. Buketov, O. O. Sapronov, M. V. Brailo, V. L. Aleksenko // Materials Science. – Vol. 49, N 5. – 2014. – P. 696-702.
3. Sapronov A. A. Forming technology epoxy nanocomposites / A. A. Sapronov, A. P. Ben, N. N. Buketova // Международна научна конференция [«Ukraine – Bulgaria – European Union: contemporary state and perspectives»], (13-15 September 2014, Варна) // Наука и экономика, 2014. – P. 49.
4. Букетов А. В. Дослідження властивостей і структури нанокомпозитних епоксидних матеріалів / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В. М. Яцюк // Вісник ЖДТУ / Серія «Техн. науки». – 2013. – Т. 3 (66). – С. 8-20.
5. Корякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Корякина. – М. : Химия, 1988. – 272 с.

### **Сапронов А.А., Рожков С.А., Лещенко А.В., Голотенко А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННЫХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ НАНОТРУБКАМИ**

*Исследовано влияние содержания нанодисперсного наполнителя на адгезионные и физико-механические свойства защитных покрытий. Установлено, что повышение адгезионных характеристик материалов обусловлено протеканием физико-химических процессов при его структурообразовании, которые активируются под влиянием предварительной ультразвуковой обработки. Обосновано, что использование ультразвуковой обработки позволяет решить проблему равномерного распределения наночастиц по объему и одновременно улучшить свойства композитов.*

*Как основной компонент для связующего при формировании эпоксидных композитов выбран эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20, который характеризуется высокой адгезионной и когезионной прочностью, незначительной усадкой и технологичностью при нанесении на поверхности сложного профиля. Для сшивания эпоксидных композиций использовано отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА, что позволяет отверждать материалы при комнатных температурах.*

*Доказано, что оптимальное содержание нанотрубок в связующем составляет  $q = 0,050$  мас.ч., что обуславливает формирование изотропного адгезионного материала. Доказано, что оптимальное содержание нанотрубок в связующем составляет  $q = 0,075$  мас.ч. при формировании материала с улучшенными физико-механическими свойствами.*

**Ключевые слова:** нанотрубки, нанокомпозитный материал, адгезионные и физико-механические свойства.

**Sapronov O.O., Rozhkov S.A., Leschenko O.B., Golotenko A.S. RESEARCH ADHESIVE AND PROPERTIES PHYSICO-MECHANICAL EPOXYCOMPOSITES FILLED NANOTUBES**

*The influence of nanodispersed filler content concerning adhesion and physical and mechanical properties of protective coatings. It was estimated that increase of adhesion characteristics of materials is caused by the occurrence of physical and chemical processes during structure formation, which are activated under the influence of advanced ultrasonic processing. It was proved that the use of ultrasonic treatment allows solving the problem of nanoparticles distribution uniforming according to volume and simultaneously improving the properties of the composites.*

*Epoxy dianov oligomer ED-20As a main component was selected to be interlink in the formation of epoxy composites; it has a high adhesive and cohesive strength, low shrinkage and adaptability when applied to the surface with complex profile. Hardener polyethylenepolyamine is used for crosslinking of epoxy compositions allowing to cure the material under room temperature.*

*It was proved that the optimal content of nanotubes in interlink is  $q = 0,050$  ppm, which leads to the formation of isotropic adhesive material. It was sustained that the optimal content of nanotubes in interlink is  $q = 0,075$  ppm alongside with formation of a material with improved physical and mechanical properties.*

**Keywords:** nanotube, nanocomposite material, adhesive and physical and mechanical properties.

© Сапронов О.О., Рожков О.С., Лещенко О.В., Голотенко О.С.

Статтю прийнято  
до редакції 28.10.14.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ З ЧАСТКАМИ ФЕРО- І ПАРАМАГНІТНОЇ ПРИРОДИ

*Скирденко В.О.*

*Херсонська державна морська академія,*

*Мініцький А.В.*

*Національний технічний університет України «КПІ»*

*У роботі проведені дослідження магнітної проникності епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками з пара- та феромагнітними властивостями. Визначено величину магнітної проникності епоксикомпозитних матеріалів, наповнених феромагнітними порошками, залізним суриком та сталлю 45. Встановлено, що максимальна величина магнітної проникності для композитів із залізним суриком при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,75$ . За такої ж напруженості поля магнітна проникність оброблених високочастотним імпульсним магнітним полем зразків підвищується несуттєво і становить  $\mu = 2,80$ . Це можна пояснити тим, що попередня магнітна обробка незначно змінює величину магнітного моменту часток даного наповнювача. Доведено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із частками Сталь 45 при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,30$ . Магнітна обробка даних часток забезпечує отримання зразків, магнітна проникність яких становить  $\mu = 2,80$ . Аналіз результатів дослідження магнітної проникності КМ, наповнених вугільним шлаком, колоїдною сіркою та карбідною шихтою дозволяє стверджувати, що використані наповнювачі відносяться до парамагнетиків. Магнітна обробка композицій з такими частками не призводить до суттєвого поліпшення властивостей епоксидних КМ.*

*Ключові слова:* епоксидний композит, феромагнітні наповнювачі, магнітна проникність.

**Постановка проблеми.** Важливим елементом конструювання нових епоксикомпозитних матеріалів є вибір наповнювачів, які б прогнозовано забезпечували необхідні як фізико-механічні, так і електротехнічні характеристики. У більшості випадків це стосується можливості створення захисних покриттів або ж конструкцій деталей машин, які б забезпечили підвищення експлуатаційних характеристик устаткування в цілому. Важливим у цьому напрямку є використання магнітної обробки як наповнювачів, так і епоксидних композицій до введення твердника, що передбачає застосування феромагнітних часток при формуванні захисних покриттів. Оптимізація часу обробки феромагнітних наповнювачів та композицій високочастотним імпульсним магнітним полем доводить, що в результаті поліпшується не лише адгезійна міцність, але й когезійні властивості матеріалів. У зв'язку з цим, важливим і актуальним є проведення дослідження з метою визначення впливу магнітних характеристик (зокрема, магнітної сприйнятності) дисперсних часток на властивості епоксидних композитних матеріалів (КМ).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стосовно магнітної проникності існуючі в природі речовини умовно можна поділити на три групи: діа-, пара- і феромагнетиками, а фізичні принципи існування матеріалів з різними магнітними властивостями ґрунтуються, насамперед, у магнетизмі їх складових – атомів і молекул. При накладанні зовнішнього магнітного поля відбувається впорядкування напрямків векторів магнітних моментів атомів і молекул речовини [1].

Аналіз літературних публікацій стосовно визначення магнітної проникності матеріалів показує, що результати щодо дослідження магнітної проникності епоксикомпозитів з феромагнітними частками висвітлені недостатньо. Переважно у наукових періодичних виданнях наведено результати дослідження магнітної проникності вакууму в присутності електромагнітного поля [2] та визначення магнітної проникності феромагнетиків при силовому впливі імпульсних магнітних полів [3].

**Мета роботи** – дослідити зміну магнітної проникності епоксикомпозитів з частками феро- і парамагнітної природи залежно від напруженості зовнішнього магнітного поля.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали КМ, вводючи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювачі використовували дрібнодисперсні (10...20 мкм) порошки: колоїдна сірка (КС) (ГОСТ 127.5-93), залізний сурик (ЗС) (складається із суміші мікроелементів і оксиду заліза ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (ГОСТ 8135-74) та карбідна шихта (КБШ). Карбідна шихта є побічним продуктом при виробництві ацетилену. Її переробка не є складною і зводиться до зневоднення матеріалу та перемелювання для отримання однорідної суміші. Експериментально встановлено, що КБШ містить солі кальцію – 58 % та інші солі – 42 %. Окрім того, у ній виявлено важкі метали наступного складу, мг/кг: цинк – 7,0; мідь – 3,8; кадмій – 1,0; свинець – 11,6; нікель – 11,6 та хром – 3,8.

Додатково використовували дисперсні (63...80 мкм) порошки, такі як: Сталь 45 (ГОСТ 1050-88), пермалой 45Н (ГОСТ 10994-74) та вугільний шлак (ВШ), що є продуктом згорання кам'яного вугілля з подрібненням його механічним способом.

Епоксидні композити формували за наступною технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20 і наповнювача та подальше введення його в епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дисперсних часток; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 300 \pm 10$  с.

Для дослідження магнітних характеристик КМ використовували зразки кільцевої форми, які виготовляли методом лиття з розмірами: зовнішній діаметр –  $d_3 = 35$  мм, внутрішній діаметр –  $d_6 = 25$  мм, висота  $h = 10$  мм. Для заливання зразків попередньо виготовляли гіпсові форми у вигляді циліндрів з діаметром  $d = 50$  мм і висотою  $h = 20$  мм, які після затвердження розточували на токарному верстаті з метою виготовлення кільцевого глухого отвору під розміри кільцевого зразка. Форму гіпсової конструкції та отриманого після заливки кільцевого зразка КМ для подальшого проведення досліджень його магнітних властивостей показано на рис. 1. Після заливання композицій заповнені форми піддавали термічній обробці за експериментально встановленим режимом: витримання зразків впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год при температурі  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 0,05$  К/с до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання КМ впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі при температурі  $T = 293 \pm 2$  К. Надалі отримані зразки шліфували до необхідних розмірів.



Рис. 1 – Гіпсова форма та отриманий після заливки кільцевий зразок

Магнітні властивості КМ визначали на вимірювальній інформаційній системі В5045, що призначена для визначення статичних магнітних характеристик (основної кривої

намагнічування, початкової магнітної проникності, максимальної магнітної проникності, залишкової індукції, коефіцієнта прямокутності петлі гистерезису, коерцитивної сили за індукцією) магніто-м'яких матеріалів з коерцитивною силою до 800 А/м. Дослідження проводили при комутаційному режимі намагнічування на зразках кільцевої форми, відповідно до вимог ДСТУ 8.377-80. Блок-схему установки наведено на рис. 2.

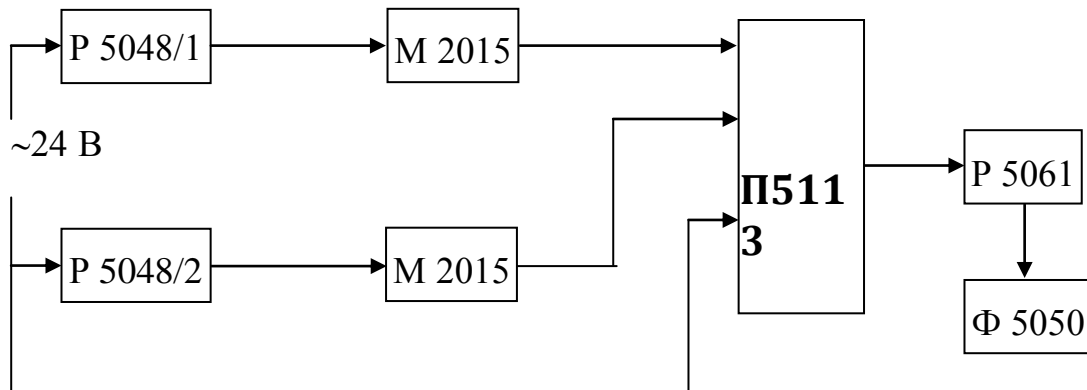


Рис. 2 – Блок-схема установки вимірювальної інформаційної системи В5045

На блок-схемі символами Р 5048/1 і Р 5048/2 позначено регулюючі пристрої, призначені для регулювання струму в ланцюзі у діапазоні від 1 мА до 15 А. Зазначимо, що у вигляді регулюючих пристроїв вибрано чотири реостати. Відповідно, символами М 2015 позначено амперметр, а символами П5113 – пристрій для випробування кільцевих зразків. Блок моделювання позначений як Р 5061. Він призначений для забезпечення безпосереднього вимірювання магнітної індукції, а за показами цифрового мікrobeберметра Ф 5050 здійснювали моделювання вимірювальної обмотки за сумарною площею вимірювальних витків.

Межа допустимої похибки ( $\Delta$ ) вимірювання магнітної індукції без обліку похибки первинного вимірювального перетворювача не перевищувала значень, розрахованих за формулою:

$$\Delta = \pm (0,01\Phi_x + \Phi_k),$$

де  $\Phi_x$  – покази мікrobeберметра, Тл;  $\Phi_k$  – кінцеве значення границі вимірювання мікrobeберметра, Тл.

Для одержання у зразку необхідної напруженості магнітного поля в намагнічуючому ланцюзі встановлювали струм, значення якого розраховали за формулою:

$$I = \frac{H \cdot W_{\text{нама}}}{\pi \cdot d_{\text{cp}}} 10^2,$$

де  $I$  – струм в намагнічуючому ланцюзі, А;  $H$  – напруженість магнітного поля А/м;  $W_{\text{нама}}$  – кількість витків в намагнічуючому ланцюзі;  $d_{\text{cp}}$  – середній діаметр зразка, мм.

Магнітну індукцію визначали шляхом вимірювання вольт-секундної площі імпульсу напруги, що наводиться у вимірювальній обмотці при зміні напрямку намагнічуючого струму. Значення магнітної проникності  $\mu$  визначали за формулою:

$$\mu = \frac{B}{H},$$

де  $B$  – магнітна індукція, Тл;  $H$  – напруженість магнітного поля, А/м.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Магнітна індукція  $B$ , що характеризує внутрішнє магнітне поле в матеріалі, пов'язана з напруженістю поля  $H$  співвідношенням:

$$B = \mu_0 \mu H,$$

де  $H$  – відносна магнітна проникність середовища.

У свою чергу:

$$B_0 = \mu_0 H, \text{ тоді } B = \mu B_0.$$

Звідси стає зрозумілим фізичний зміст величини  $\mu$ : відносна магнітна проникність середовища показує, у скільки разів змінюється індукція магнітного поля, якщо простір, у якому воно існує, заповнити певним магнетиком. Залежно від значення магнітної проникності  $\mu$ , матеріали поділяють на три групи: діа-, пара- і ферромагнетики. Для діамagnetиків магнітна проникність  $\mu < 1$ , для парамагнетиків –  $\mu > 1$ , для ферромагнетиків  $\mu \gg 1$ . У випадку діа- і парамагнетиків магнітна проникність несуттєво відрізняється від одиниці [1, 4].

Як було наведено вище, фізичні принципи існування матеріалів з різними магнітними властивостями ґрунтуються насамперед у магнетизмі їх складових – атомів і молекул. У атомах і молекулах будь-якої речовини існують колові струми, зумовлені рухом електронів по орбітах навколо ядер. Таким чином виникають орбітальні струми. Кожному такому орбітальному струму відповідає певний магнітний момент – орбітальний магнітний момент, який визначається добутком сили колового струму на площу, яку він охоплює. Вектор орбітального магнітного моменту напрямлений уздовж осі колового струму (збігається з напрямом індукції магнітного поля в центрі колового струму). До того ж для електронів характерний власний, або спіновий, магнітний момент. Власний магнітний момент мають ядра атомів. Геометрична сума орбітальних та спінових магнітних моментів електронів і власного магнітного моменту ядра утворює магнітний момент  $P_m$  атома (молекули) речовини. При накладанні зовнішнього магнітного поля відбувається впорядкування напрямів векторів магнітних моментів атомів і молекул магнетика, внаслідок чого макроскопічний об'єм  $V$  магнетика набуває певного сумарного магнітного моменту – речовина намагнічується.

Для характеристики намагнічування речовин введено фізичну величину, яку називають інтенсивністю намагнічування. Вектором інтенсивності намагнічування  $I$  називають границю відношення магнітного моменту будь-якого об'єму речовин до цього об'єму [1]:

$$\bar{I} = \lim_{V \rightarrow 0} \left( \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \bar{P}_{mi} \right),$$

де  $n$  – кількість часток, що містяться в об'ємі  $V$  речовини;  $P_{mi}$  – магнітний момент окремої частки (атома або молекули).

Експериментально встановлено, що інтенсивність намагнічування пропорційна напруженості зовнішнього магнітного поля, тобто:

$$I = \chi H.$$

Величину  $\chi$ , яка чисельно дорівнює магнітному моменту одиниці об'єму матеріалу, внесеного в магнітне поле з одиничною напруженістю, називають магнітною сприйнятністю речовини. На відміну від магнітної проникності, що характеризує вплив матеріалу на магнітне поле, магнітна сприйнятність характеризує вплив поля на матеріал. Відповідні теоретичні розрахунки показують, що  $\mu$  і  $\chi$  пов'язані співвідношенням:

$$\mu = 1 + \chi.$$

Магнітна сприйнятність – безрозмірна величина. Для діамagnetиків  $\chi < 0$ , а для парамагнетиків  $\chi > 0$ . У випадку ферромагнетиків магнітна сприйнятність також додатна величина, але на відміну від парамагнетиків, має великі числові значення. До того ж для них характерна залежність магнітної сприйнятності від напруженості зовнішнього магнітного поля. Такої залежності немає у парамагнетиків і діамagnetиків [4].

Як було наведено вище, істотною особливістю феромагнетиків є залежність  $\mu$  від  $H$ . Відносна магнітна проникність  $\mu$  феромагнетика спочатку швидко зростає зі збільшенням  $H$ , досягає максимуму, а потім знижується, наближаючись до одиниці при сильних намагнічуючих полях. Це можна пояснити, виходячи з того, що:

$$\mu = 1 + \chi = 1 + \frac{I}{H}.$$

При насиченні  $I = const$ . Якщо напруженість зовнішнього магнітного поля  $H$  прямує до нескінченності, а  $\frac{I}{H} \rightarrow 0$ , тоді  $\mu \rightarrow 1$ . Максимальні значення  $\mu$  для феромагнетиків досить великі. Зокрема, для заліза –  $\mu_{max} = 5000$ , для силіцієвого заліза (що містить 3,3 % Si) –  $\mu_{max} = 10\ 000$ , для чавуну (3 % C) –  $\mu_{max} = 2000$ , а для пермалюю (78 % Ni і 22 % Fe) –  $\mu_{max} = 100\ 000$ .

Для феромагнетиків характерна ще одна особливість: за певної для кожного феромагнетика температури  $T_k$ , яку називають точкою Кюрі, вони втрачають притаманні їм властивості й перетворюються у звичайний парамагнетик. Залежність магнітної сприйнятності  $\chi$  від температури для таких парамагнетиків описується законом Кюрі – Вейса:

$$\chi = \frac{C'}{T - T_k},$$

де  $C'$  – стала, що залежить від природи матеріалу;  $T$  – абсолютна температура;  $T_k$  – температура Кюрі.

Температура Кюрі неоднакова для різних феромагнетиків. Наприклад, для заліза вона становить 780 °С, для кобальту – 1150 °С, для нікелю – 358 °С.

Без зовнішнього магнітного поля вектори магнітних моментів окремих доменів орієнтовані в просторі хаотично, тому результуючий магнітний момент усього матеріалу дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле, що діє на феромагнетик, орієнтує магнітні моменти не окремих часток, як це було у випадку парамагнетиків, а цілих ділянок спонтанного намагнічування. Очевидно, магнітне насичення настає тоді, коли вектори магнітних моментів у всіх ділянках спонтанного намагнічування встановлюються паралельно зовнішньому магнітному полю. Властивість феромагнетика зберігати намагніченість у поєднанні з магнітною проникністю зразків досліджуваних матеріалів, можуть бути застосовані для тих чи інших практичних цілей, наприклад, для отримання певного значення магнітної проникності магнітопроводів сигнальних трансформаторів електроустаткування машин, суден, електропотягів.

Виходячи з наведеного вище, можна констатувати, що, безумовно, актуальним при створенні нових, модифікованих високочастотним магнітним полем епоксидних матеріалів, є дослідження магнітних характеристик композитів з феромагнітними наповнювачами. У нашому випадку це порошки залізного сурику (ЗС) з розміром 10...20 мкм і Сталі 45 з розміром 63...80 мкм.

Результати досліджень магнітної проникності епоксикомпозитних матеріалів з наповнювачами різної природи та дисперсності наведено на рис. 3 – рис. 10. Слід зауважити, що додатково феромагнітні наповнювачі (Сталь 45 та залізний сурик) до введення в олігомерний зв'язувач ЕД-20 піддавали впливу високочастотного магнітно-імпульсного поля (ВМП) з попередньо визначеними оптимальними для обраних меж досліджень параметрами [5].

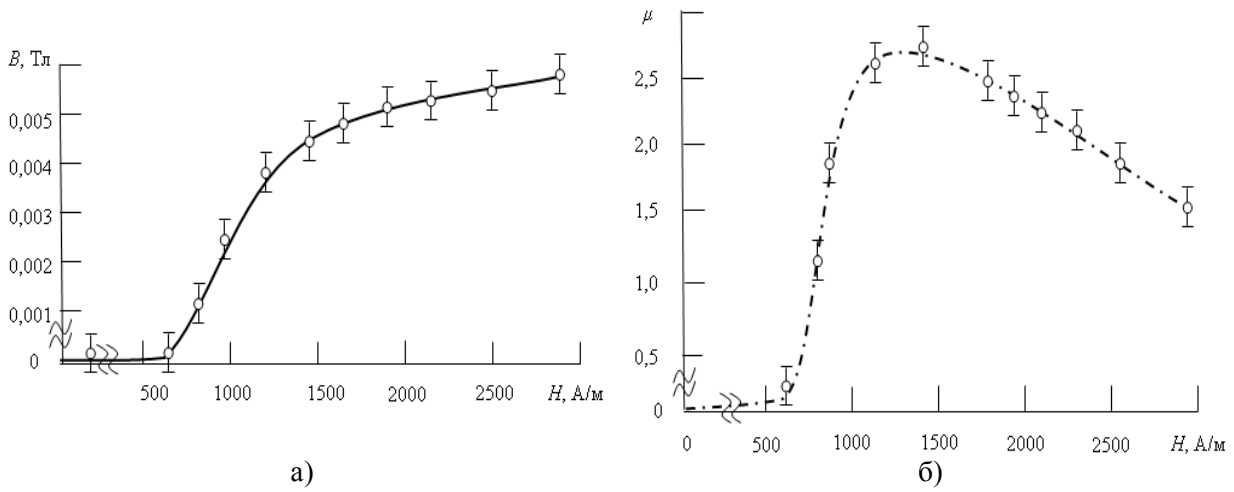


Рис. 3 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками ЗС ( $q = 50$  мас.ч.)

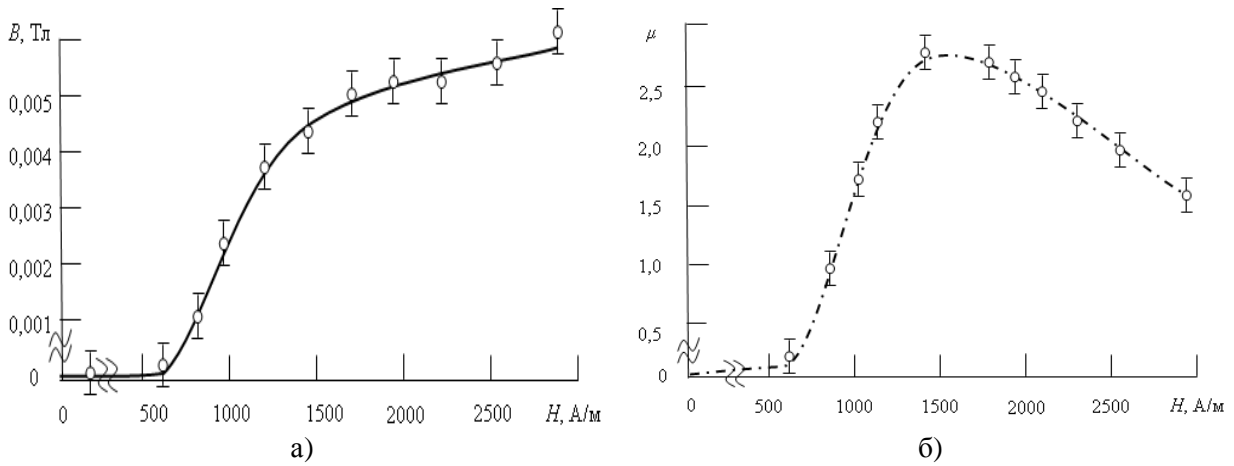


Рис. 4 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із модифікованими ВМІП частками ЗС ( $q = 50$  мас.ч.)

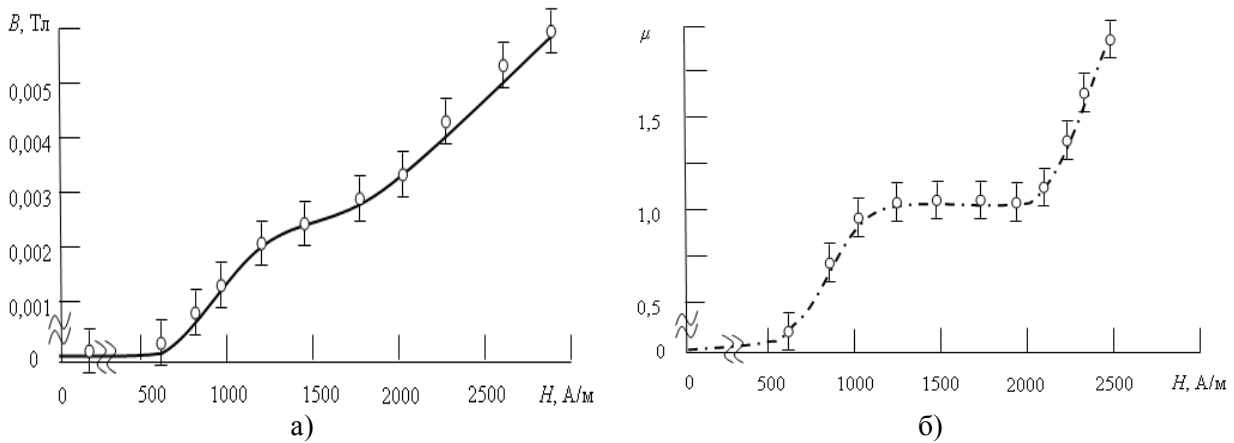


Рис. 5 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками КБШ ( $q = 50$  мас.ч.)

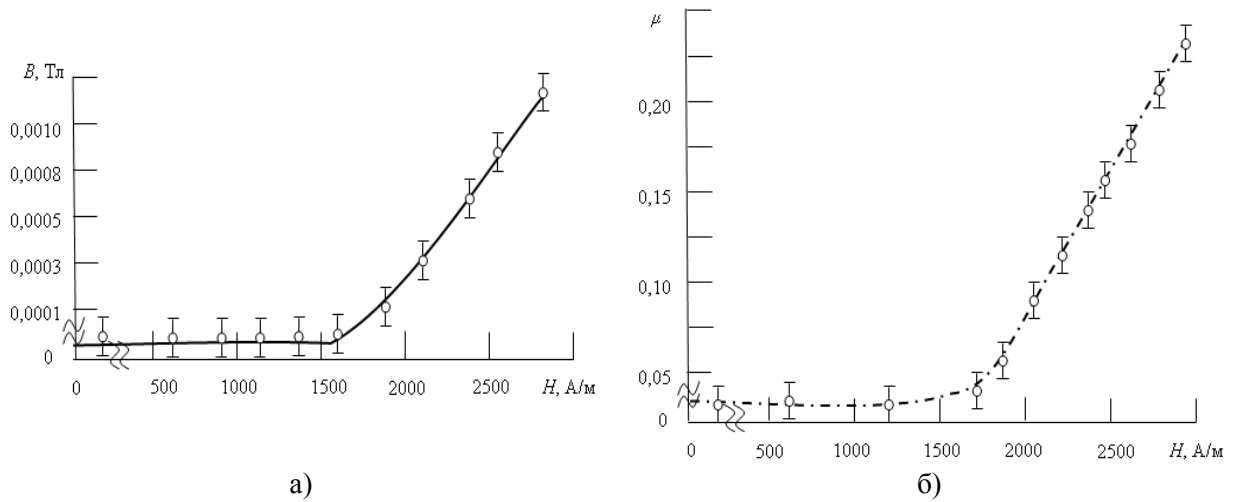


Рис. 6 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ з частками КС ( $q = 50$  мас.ч.)

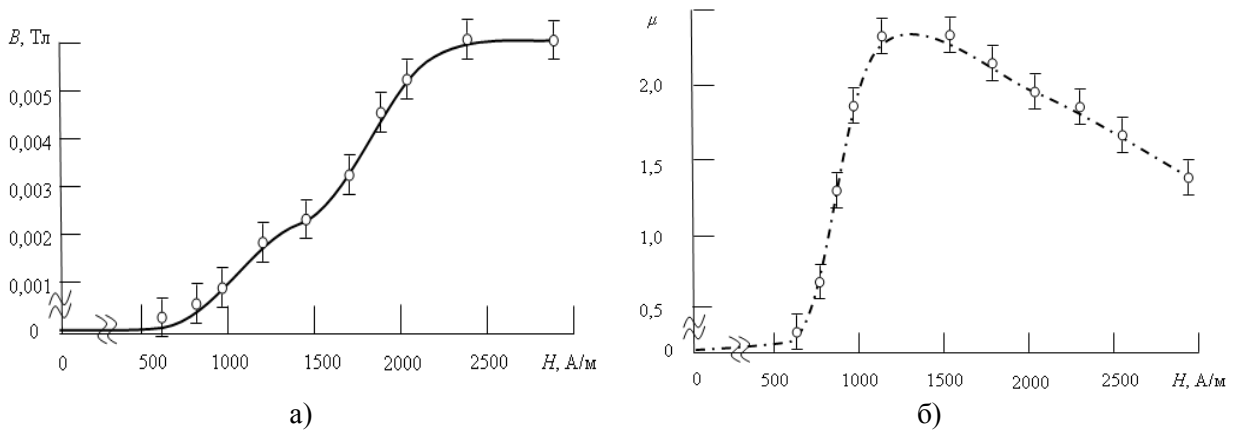


Рис. 7 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками Сталь 45 ( $q = 50$  мас.ч.)

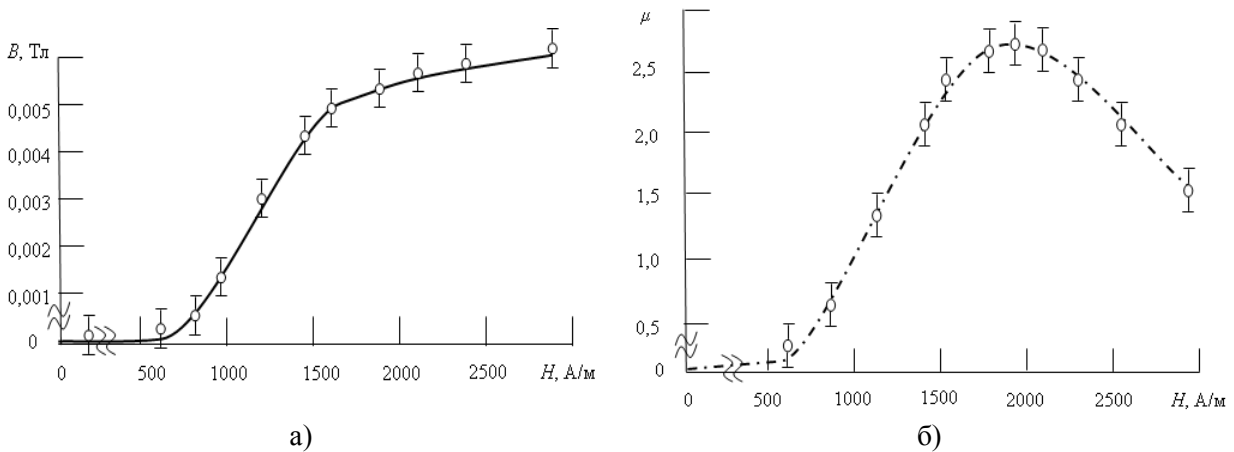


Рис. 8 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ з модифікованими ВІМП частками Сталь 45 ( $q = 50$  мас.ч.)

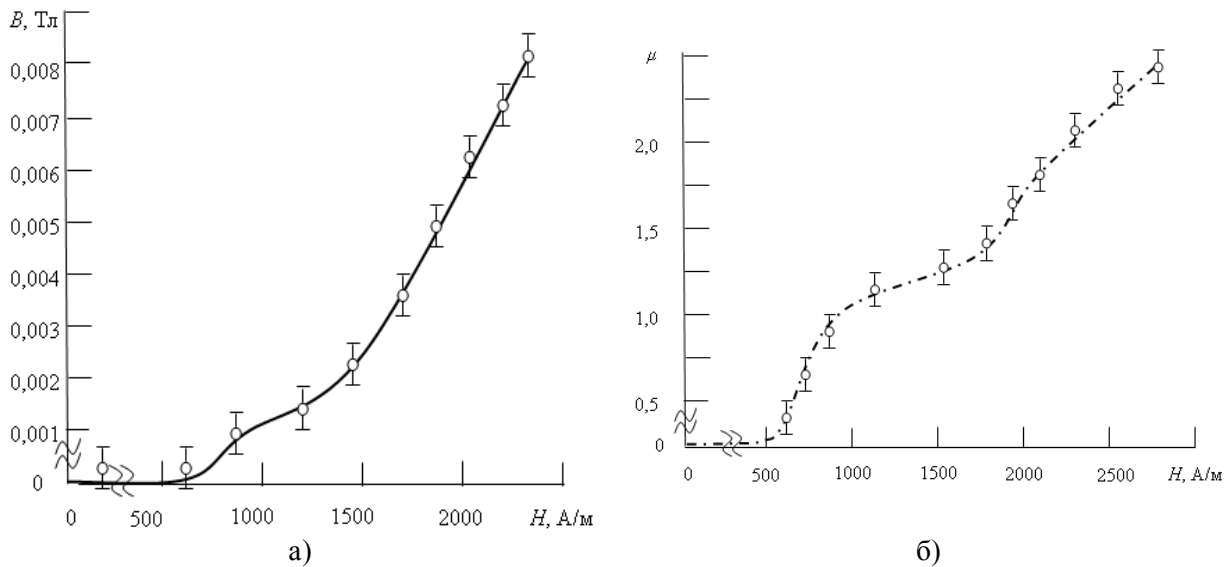


Рис. 9 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками ВШ ( $q = 50$  мас.ч.)

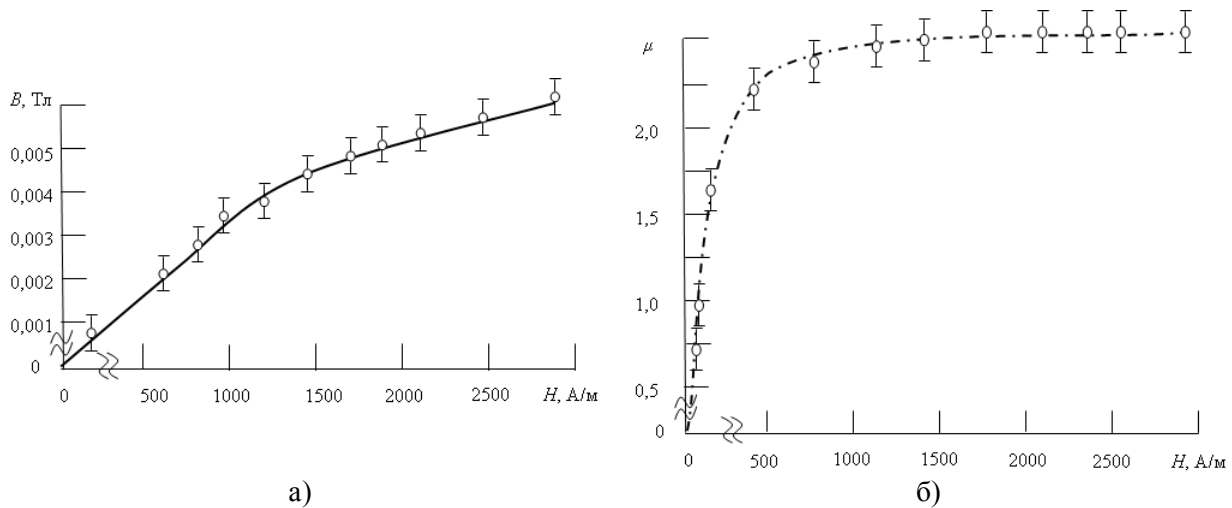


Рис. 10 – Залежність магнітної індукції  $B$  (а) та магнітної проникності  $\mu$  (б) від напруженості  $H$  магнітного поля для КМ із частками пермалю Н 45 ( $q = 50$  мас.ч.)

Аналіз наведених графічних залежностей показує, що для усіх КМ з феромагнітними наповнювачами (ЗС і Сталь 45) підвищення напруженості зовнішнього магнітного поля призводить до збільшення магнітної індукції (рис. 3, рис. 4, рис. 7, рис. 8). При цьому зростає також і величина магнітної проникності, хоча при досягненні певної величини насичення вона спадає. Експериментально встановлено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із залізним суриком при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,75$  (рис. 3). За такої ж напруженості поля магнітна проникність оброблених ВІМП зразків підвищується несуттєво і становить  $\mu = 2,80$ . Це можна пояснити тим, що попередня обробка ВЕІП незначно змінює величину магнітного моменту часток даного наповнювача. Навпаки, доведено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із частками Сталь 45 при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,30$  (рис. 7). Обробка даних часток ВЕІП забезпечує отримання зразків, магнітна проникність яких становить  $\mu = 2,80$ . Таке підвищення проникності під дією ВІМП можна пояснити впливом зовнішнього магнітного поля на магнітні властивості порошку, що визначаються структурою його атомів і характером взаємодії між ними. Крім того, експериментально доведено [6], що магнітна обробка композицій з даним наповнювачем забезпечує підвищення показників адгезійних та когезійних властивостей епоксикомпозитів. Можна припустити, що після попередньої

обробки ВІМП матеріалів при їх зшиванні за рахунок збільшеного магнітного моменту наповнювача активуються міжфазові процеси взаємодії. У цьому випадку формуються на межі поділу фаз «наповнювач – полімер» зовнішні поверхневі шари значної товщини, що підвищує вміст гель-фракції у модифікованих КМ. Додатково слід зазначити, що інтенсивність зростання величини магнітної проникності для КМ з частками сталі є дещо вищою, порівняно з КМ, наповнених залізним суриком. Це можна пояснити хімічним складом та структурою введених у епоксидний олігомер добавок.

Важливе наукове і практичне значення мають дослідження магнітної проникності КМ, наповнених вугільним шлаком, колоїдною сіркою та карбідною шихтою. Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 5, рис. 6, рис. 9) дозволяє стверджувати, що використані наповнювачі відносяться до парамагнетиків. При цьому обробка ВІМП композицій з таким частками не приведе до суттєвого поліпшення властивостей епоксидних КМ. Аналіз результатів дослідження КМ з частками КС (рис. 6) дозволяє стверджувати, що дана добавка є парамагнетиком з досить малою величиною магнітної проникності. Додатково це можна використати для аналізу наповнювача і зазначити, що в його складі майже повністю відсутні речовини з феромагнітними чи діамагнітними властивостями.

Особливу увагу, на наш погляд, слід звернути на результати дослідження магнітної проникності КМ з порошком пермалою Н 45 (рис. 10). На залежності індукції та магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля виявлено горизонтальні ділянки, що свідчить про наявність феромагнітних складових у даних частках (залізо та нікель). Однак, відсутність певної точки насичення, яку виявлено у досліджуваному діапазоні напруженості магнітного поля для композитів, наповнених залізним суриком та частками Сталі 45 доводить наступне. Таку точку магнітного насичення не можливо досягнути за даного вмісту ( $q = 50$  мас.ч.) наповнювача в олігомерній матриці ЕД-20 та у вибраному діапазоні напруженості магнітного поля.

**Висновки.** Наведені у роботі експериментальні дослідження дозволяють констатувати наступне:

1. Визначено величину магнітної проникності епоксикомпозитних матеріалів наповнених феромагнітними порошками (залізним суриком та Сталлю 45). Встановлено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із залізним суриком при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,75$ . За такої ж напруженості поля магнітна проникність оброблених високочастотним імпульсним магнітним полем зразків підвищується несуттєво і становить  $\mu = 2,80$ . Це можна пояснити тим, що попередня магнітна обробка незначно змінює величину магнітного моменту часток даного наповнювача. Доведено, що максимальна величина магнітної проникності для КМ із частками Сталь 45 при напруженості поля  $H = 1300$  А/м становить  $\mu = 2,30$ . Магнітна обробка даних часток забезпечує отримання зразків, магнітна проникність яких становить  $\mu = 2,80$ .

2. Аналіз результатів дослідження магнітної проникності КМ, наповнених вугільним шлаком, колоїдною сіркою та карбідною шихтою дозволяє стверджувати, що використані наповнювачі відносяться до парамагнетиків. Магнітна обробка композицій з таким частками не приводить до суттєвого поліпшення властивостей епоксидних КМ. На залежності індукції та магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля для зразків з частками пермалою Н 45 виявлено горизонтальні ділянки, що свідчить про наявність феромагнітних складових у даних частках (залізо та нікель).

Надалі авторами заплановано встановити вплив тривалості високочастотної магнітної обробки композицій на когезійні властивості епоксикомпозитів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Чолпан П. П. Фізика / П. П. Чолпан. – К. : Вища школа, 2003. – 567 с.
2. Агоп М. Тензори діелектричної і магнітної проникності вакууму в присутності електромагнітного поля / М. Агоп // Наукові праці Вінницького національного технічного університету – 2011. – № 4. – С. 34-42.
3. Степанов А. А. Определение магнитной проницаемости ферромагнетиков при силовом воздействии импульсных магнитных полей / А. А. Степанов, В. М. Барбашова // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. – 2013. – № 5. – С. 111-113.
4. Руководство к лабораторным занятиям по физике / [Голдин Л. Л., Игошин Л. Ф., Козел С. М. и др.] ; под ред. Л. Л. Голдина. – М. : Наука, 1973. – 687 с.
5. Скирденко В. О. Оптимізація режимів високочастотної електромагнітної обробки епоксидних композитів методом математичного планування експерименту / В. О. Скирденко, О. В. Акімов // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2013. – № 4 (67). – С. 28-36.
6. Новейшие инструментальные методы исследования структуры полимеров / под ред Дж. Кенига. – М. : Мир, 1982. – 420 с.

**Скирденко В.О., Мініцький А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ С ЧАСТИЦАМИ ФЕРРО- И ПАРАМАГНИТНОЙ ПРИРОДЫ**

*В работе проведены исследования магнитной проницаемости эпоксидных композитных материалов, наполненных порошками с пара- и ферромагнитными свойствами. Определена величина магнитной проницаемости эпоксидных композитных материалов, наполненных ферромагнитными порошками железным суриком и Сталью 45. Установлено, что максимальная величина магнитной проницаемости для композитов с железным суриком при напряженности поля  $H = 1300$  А/м составляет  $\mu = 2,75$ . По такой же напряженности поля магнитная проницаемость обработанных высокочастотным импульсным магнитным полем образцов повышается незначительно и составляет  $\mu = 2,80$ . Это можно объяснить тем, что предварительная магнитная обработка незначительно изменяет величину магнитного момента частиц данного наполнителя. Доказано, что максимальная величина магнитной проницаемости для композитов с частицами Сталь 45 при напряженности поля  $H = 1300$  А/м составляет  $\mu = 2,30$ . Магнитная обработка данных частиц обеспечивает получение образцов, магнитная проницаемость которых составляет  $\mu = 2,80$ . Анализ результатов исследования магнитной проницаемости композитов, наполненных угольным шлаком, коллоидной серой и карбидной шихтой позволяет утверждать, что использованные наполнители относятся к парамагнетикам. Магнитная обработка композиций с такими частицами не приводит к существенному улучшению свойств эпоксидных композитов.*

**Ключевые слова:** эпоксидный композит, ферромагнитные наполнители, магнитная проницаемость.

**Skirdenko V.O., Minskiy A.V. STUDY OF MAGNETIC PERMEABILITY OF EPOXY-FILLED COMPOSITES WITH PARTICLES OF FERRO- AND PARAMAGNETIC NATURE**

*Research of magnetic permeability of epoxy-composite materials filled with powders having para- and ferromagnetic properties was conducted. Value of magnetic permeability of epoxy composite materials filled with ferromagnetic powders, iron minium and steel 45 was determined. It was established that the maximum value of the magnetic permeability for composites with iron minium under field strength of  $H = 1300$  A/m is  $\mu = 2.75$ . Under the same field strength magnetic permeability of the samples processed with high-frequency pulsed magnetic field increases slightly and constitutes  $\mu = 2.80$ . This can be explained by the fact that the preliminary magnetic treatment slightly changes the value of the magnetic moment of particles of this filler. It was proved that the maximum value of the magnetic permeability for composites with particles of Steel 45 if field strength  $H = 1300$  A/m constitutes  $\mu = 2.30$ . Magnetic treatment of the particles ensures production of samples with magnetic permeability of  $\mu = 2.80$ . Results analysis of study of magnetic permeability of composites filled with coal slag, colloidal sulfur and carbide mixture allows to assert that the fillers used are regarded to be paramagnetic. Magnetic treatment of composition with such particles does not lead to a significant improvement of the properties of epoxy-filled composites.*

**Keywords:** epoxy-filled composite, ferromagnetic fillers, magnetic permeability.

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАГНИТНЫХ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПОЛЯХ

*Скирденко О.И.*

*Херсонский государственный университет,*

*Клевцов К.М., Шарко А.В., Михайлик В.Д.*

*Херсонская государственная морская академия*

*Одним из весьма простых методов повышения износостойкости режущих и других видов инструментов является их обработка в магнитных и магнитно-импульсных полях. Такая технология не требует больших материальных затрат, мало энергоемкая, но позволяет повысить его стойкость в 1,3 ... 1,5 раза.*

*Несмотря на многолетние исследования влияния магнитных полей на физико-механические свойства инструментальных материалов, технологические характеристики магнитно-обработанных инструментов еще исследованы недостаточно, в особенности это относится к специальным видам режущих и других видов инструментов.*

*Цель работы – установить основные направления модификации инструментальных материалов в магнитных и магнитно-импульсных полях для улучшения их свойств.*

*Следует отметить, что, несмотря на большое количество направлений модификации материалов, они дают возможность лишь поверхностно судить о протекающих явлениях, режимах обработки, что не позволяет использовать их результаты для промышленного применения. Применение метода магнитной и магнитно-импульсной обработки режущих инструментов и деталей машин, изготовленных из различных материалов, усложняется еще и тем, что для этого необходимы разработка и изготовление специальных установок в соответствии с габаритами и формой инструментов и деталей машин, которые будут подвергаться обработке.*

*Ключевые слова:* магнитная обработка, инструмент, материал.

**Введение.** Одним из весьма простых методов повышения износостойкости режущих и других видов инструментов является их обработка в магнитных и магнитно-импульсных полях. Такая технология не требует больших материальных затрат, мало энергоемкая (т. к. обработка проводится в течение малого промежутка времени), но позволит повысить его стойкость в 1,3 ... 1,5 раза.

**Актуальность исследования.** Несмотря на многолетние исследования влияния магнитных полей на физико-механические свойства инструментальных материалов (с 1929 года), технологические характеристики магнитнообработанных инструментов еще исследованы недостаточно, в особенности это относится к специальным видам режущих и других видов инструментов.

**Цель работы** – установить основные направления модификации инструментальных материалов в магнитных и магнитно-импульсных полях для улучшения их свойств.

**Обсуждение результатов.** Анализируя современное состояние магнитно-импульсной обработки инструментальных материалов следует отметить, что Гербертом еще в 1924 году отмечалось о влиянии магнитного поля на физико-механические свойства сталей типа P18. В исследованиях образец быстрорежущей стали подвергался воздействию магнитного поля напряженностью 120 кА/м (1500 э), при этом отмечалось повышение твердости исследуемого материала. Измерение твердости проверялось по маятниковому способу.

Продолжая исследования Герберта, А. В. Алексеев установил влияние магнитной обработки быстрорежущих сталей на их коррозионную стойкость. Он также определил, что полученный прирост твердости до HRC 67 сохраняется и после размагничивания образцов, однако стабилизация твердости происходит только после нескольких часов после обработки.

В 1958 году во Всесоюзном научно-исследовательском инструментальном институте Л. А. Чудновской [1] исследовано влияние магнитного поля на повышение качества инструментов из различных сталей Р18, Х12Ф1, ХВГ и других. При этом изучали влияние переменного и постоянного магнитных полей на распад остаточного аустенита, прочность при изгибе. Установлено, что постоянное магнитное поле улучшает механические свойства сталей ХВГ и Р18 при изгибе, соответственно, на 65% и 25%. Магнитный отпуск ускорял распад остаточного аустенита в стали Р18. Целая серия различных испытаний инструментальных материалов позволила найти оптимальные режимы их магнитной обработки и выполнить испытания режущих инструментов. В результате испытаний установлено, что стойкость инструментов (сверл) повышается в 1,9 раза (рис. 1).

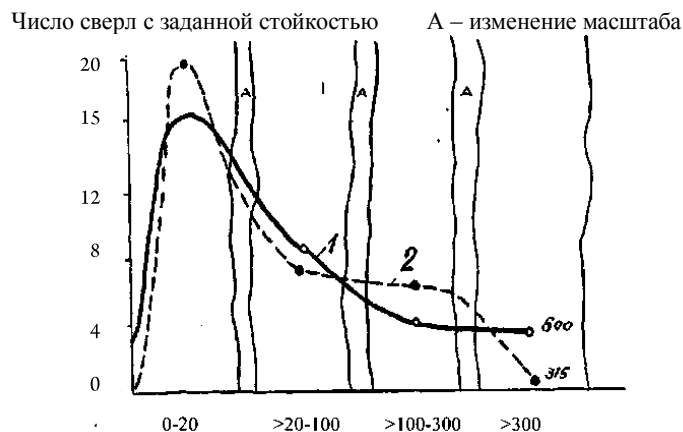


Рис. 1 – Кривые распределения стойкости сверл, подвергнутых магнитному отпуску: в течении 30 мин (кривая 1) и стандартному трехкратному отпуску при 560 °С (кривая 2)

Кроме отмеченного выше анализа ранее выполненных работ по магнитной обработке режущих инструментов, представляют интерес работы, выполненные в Украине и за рубежом в последние 10–15 лет.

Многие исследователи отмечают, что в результате взаимодействия инструмента и заготовки в процессе резания под влиянием термо-ЭДС возникает электромагнитная индукция, характеризующаяся напряженностью магнитного поля. Магнитное поле при этом имеет постоянную полярность, так как термо-ЭДС обладает постоянной направленностью.

Магнитная и электрическая полярность определяются в каждом конкретном случае сочетанием свойств материалов инструмента и заготовки, влиянием внешних магнитных, электрических и тепловых полей, действием ряда других факторов. Однако при любой полярности влияние магнитного поля приводит к накапливанию пылевидных микро-частиц металла в зоне резания, их намагничиванию и поляризации. Поляризованные частицы металла налипают на поверхности инструмента и заготовки, заряженные обратной полярностью, и действуют как абразивные микропорошки. Они создают в зоне резания эффект абразивного изнашивания и разрушения. Влияние этого эффекта распространяется на металл заготовки и инструмента. Его проявление на поверхности заготовки совпадает с целью процесса резания. Напротив, эффект налипания микро-частиц на лезвие инструмента приводит к увеличению силы трения и к абразивному изнашиванию его поверхности. В результате стойкость инструмента снижается.

Таким образом явления, возникающие в зоне резания в результате влияния магнитного поля, вызывают увеличение напряженности этого поля, что, в свою очередь, усиливает разрушительную силу описанных выше процессов. Следовательно, эффект разрушения лезвия инструмента под действием индуцированного магнитного поля постоянно усиливается. Развиваясь по восходящей кривой, он достигает максимального значения, характеризующегося точкой катастрофического разрушения, т.е. моментом выхода инструмента из строя.

Явления, подобные описанным выше, в той или иной степени возникают не только в паре инструмент – заготовка, но и в любой трущейся паре металлических деталей. Нельзя утверждать, что эти явления служат единственной или преобладающей причиной разрушения поверхностей инструментов или детали при резании металла или при работе трущейся пары. Однако они оказывают существенное влияние на скорость и характер протекания таких процессов.

При обработке углеродистой стали намагниченными резцами из быстрорежущей стали лучшие результаты достигаются инструментами, режущая кромка которых является северным полюсом магнита. Увеличение тока намагничивания, а следовательно, степени намагниченности до предела магнитного насыщения, приводит к возрастанию стойкости резцов. Влияние намагничивания на изнашивание резцов особенно заметно при работе с малыми значениями подачи (до 0,14 мм/об) и скорости резания до 15 м/мин. Намагничивающей обработке подвергают стальные режущие инструменты: резцы, сверла, развертки, метчики, плашки и др., а также ножи, матрицы и пуансоны разделительных штампов для холодной штамповки.

В свое время на кафедре технологии конструкционных материалов Санкт-Петербургского политехнического института И. А. Сенчило выполнены исследования по технологическим вопросам перемагничивания режущих инструментов. При этом выявлены оптимальные технологические режимы перемагничивания инструментов, обеспечивающие повышение их стойкости: частота перемагничивания – 2...4 Гц, магнитная индукция на рабочих поверхностях инструментов – 0,5...0,7 Т, длительность перемагничивания – 5000 циклов. Установлено также, что на величину и распределение магнитной индукции на рабочей поверхности инструмента при перемагничивании влияют: форма сечения инструмента, его размеры, угол поворота и положение инструмента в осевом направлении относительно магнитных полюсов.

В рассматриваемом исследовании отмечается, что перемагничивание не влияет на механические свойства составляющих материала инструмента, изготовленных из не закаленных конструкционных сталей.

Повышение стойкости инструментов имеет место во всем исследованном диапазоне скоростей и подач ( $V=5...70$  м/мин,  $S=0,07...0,21$  мм/об). Однако интенсивность роста для разных скоростей и подач оказалась неодинаковой. Наибольшее повышение стойкости в результате перемагничивания (до 2 раз) имеет место при небольших скоростях резания и подачах.

Переточка инструментов снимает эффект повышения стойкости в результате перемагничивания. Выдержка перемагниченных инструментов в течение длительного времени (в данных исследованиях до 10 месяцев) не снижает величины эффекта повышения их стойкости. Ряд важных исследований влияния магнитной обработки на стойкость режущих инструментов были выполнены Любеном Димитровым (Болгария). Им дан критический анализ гипотез по рассматриваемому вопросу, показана противоречивость некоторых исследований, отмечающих, как основную из причин получения эффекта, повышение стойкости намагниченных инструментов за счет термомагнитных явлений. Целый ряд работ, как отмечает Л. Димитров [2], показывают, что намагниченное состояние режущих инструментов не влияет на температуру резания, т.е. термомагнитный эффект при этом не наблюдается.

Полученные результаты исследований в рассматриваемой работе, полностью подтвердили сделанное предположение о влиянии магнитной обработки на аустенитно-мартенситное превращение поверхностных слоев, полученных после заточки быстрорежущих сталей. При заточке вследствие большого локального нагрева поверхностных слоев инструментов из быстрорежущих сталей происходят значительные структурные изменения. Фазовый состав этих слоев характеризуется большим количеством остаточного аустенита. Хрупкость, низкая теплоустойчивость и большая склонность к адгезии этого аустенита, а также и остаточное напряжение, которое им создается, определяют пониженную износостойчивость режущей кромки.

Быстрорежущие инструменты, подверженные воздействию сильных постоянных или переменных магнитных полей, проявляют увеличенную стойкость, что объясняется аустенитно-мартенситными превращениями в поверхностном вторично закаленном слое, полученном при заточке.

В подтверждение исследований Любена Димитрова ученые Узбекистана: А. А. Анцупов, Э. А. Умаров, С. М. Хасанов в своих работах также отмечают влияние магнитного поля при заточке инструмента на его стойкость при резании. Эксперименты проводили со сталью Р18, обрабатываемый материал – сталь 30ХГСА. При этом геометрические параметры резца следующие:  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ;  $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$ ;  $\gamma = 0^\circ$ ;  $\lambda = 0^\circ$ . Время резания  $t = 20$  мин. Измерили износ на задней поверхности. Режущий инструмент намагничивали непосредственно во время заточки. Эксперименты проводили двумя подачами:  $S = 0,11$  мм/об и  $S = 0,23$  мм/об.

Результаты экспериментов показали, что при намагничивании режущего инструмента износ уменьшается, причем наибольшее уменьшение износа наблюдается при намагничивании южной полярностью магнитного поля. Затем в этих же режимах были проведены эксперименты с намагничиванием резца после заточки. В этом случае наблюдали увеличение износа, по сравнению с намагничиванием во время заточки.

Отмеченные авторы выполнили так же исследование по влиянию намагничивания режущего инструмента на его стойкость при обработке парамагнитных материалов. Эксперименты проводили продольным точением на токарном станке. Обрабатывали титановый сплав марки БТ-3. В качестве режущего инструмента применяли резец из быстрорежущей стали Р18 со следующей геометрией:  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ;  $\alpha = \alpha_1 = 7^\circ$ ;  $\gamma = 0^\circ$ ;  $\lambda = 0^\circ$ . Во всех экспериментах подача оставалась постоянной  $S = 0,11$  мм/об. Эксперименты проводили двумя резцами при скоростях резания  $V = 12$  м/мин,  $V = 10$  м/мин. Стойкость при прямой подаче была намного больше, чем при обратной. Перед экспериментом резцы были магнитно обработаны.

По мнению авторов, в таких случаях при обратной подаче охлаждение действует негативно и в результате этого стойкость резко уменьшается. Для выяснения влияния охлаждения применяли дополнительные охлаждающие средства. В этом случае качественное соотношение между прямой и обратной подачей не изменилось.

Для того, чтобы выяснить, как влияет магнитное поле в таких случаях на стойкость инструмента, в последующих экспериментах намагничивали рабочую часть режущего инструмента северной и южной полярностью магнитного поля. При резании с прямой подачей с намагничиванием рабочей части режущего инструмента северным полюсом стойкость режущего инструмента понизилась в несколько раз, а южным полюсом, наоборот, увеличилась.

На основании выполненных опытов авторы вышеуказанных исследований делают вывод, что при обработке парамагнитного титанового сплава БТ-3 в указанных выше условиях, влияние термомагнитных явлений на процесс резания отличается от влияния их при обработке ферромагнитных материалов.

Следует подчеркнуть, что отмеченный выше вывод исследователей из Узбекистана не разделяют целый ряд исследователей, отмечающих, что температура резания для магнитно обработанных резцов и не обработанных не изменяется.

Важные исследования [3, 4] по определению влияния магнитной обработки на стойкость режущих инструментов были выполнены под руководством М. Т. Галея. При этом исследовали влияние наведенной полярности на стойкость отрезных резцов из стали Р18 при обработке стали 50. Установлен эффект повышения стойкости резцов из быстрорежущих сталей в 4 раза если режущая часть резца имеет северную полярность. Обработка концевых фрез и сверл производилась также северной полярностью (на режущей части) в поле напряженностью 18 кЭ. Повышение стойкости магнитно обработанных инструментов при обработке чугуна СЧ 18 составило 2,5...3,5 раза.

Особо следует отметить исследования по рассматриваемому вопросу, выполненные в Ташкенте [5–7] и Нижнем Новгороде [8–10] под руководством Г. И. Якунина и С. Н. Постникова.

В работах [3, 7], было установлено, что искусственное намагничивание быстрорежущих резцов значительно влияет на их стойкость и если рабочая часть резца имеет северную полярность, стойкость заметно возрастает. При обратном направлении намагничивания вдоль продольной оси резца его стойкость значительно снижается. Следовательно, стойкость является нечетной функцией направления намагничивания.

Так как одним из основных факторов, влияющих на стойкость режущего инструмента, является температура резания, было высказано предположение, что при намагничивании изменяется температура резцов и их стойкость за счет нечетных термомагнитных явлений. Анализ термомагнитных явлений позволил сделать предположение, что основной причиной изменения температуры резания является эффект Риги-Ледюка, который можно трактовать как поворот теплового потока под действием магнитного поля в сторону относительно направления градиента температуры при условии отсутствия магнитного поля. В упрощенном виде это выглядит следующим образом.

При наличии в процессе резания перпендикулярно передней поверхности градиента температуры носители электрических зарядов (электроны, дырки) диффузионно перемещаются из области высокой температуры в область более низкой. При этом они переносят также и тепловую энергию. Направление переноса, как свидетельствуют авторы, зависит от полярности резца.

Ряд фундаментальных работ выполнен в политехническом институте (г. Нижний Новгород) под руководством С. Н. Постникова. В этих работах на основе проведенных экспериментов анализируются факторы, влияющие на эффективность упрочнения инструмента из быстрорежущих сталей импульсным магнитным полем [8, 10].

Основу метода составляет локальное поглощение энергии на неоднородностях структуры стали, приводящее к ее перестройке. Упрочнение стали путем обработки импульсным магнитным полем (ОИМП) протекает по смешанному дислокационно-диффузионному механизму. Его характерной особенностью является сосуществование процессов диффузионной и микросдвиговой релаксации остаточных напряжений с ростом плотности дефектов, требующим выдержки инструмента (стабилизирующего отжига стали) при комнатной (25 °С) или повышенной (250...400 °С) температуре для получения термо-стабильной дефектной структуры. При высокой культуре заточных операций эффект ОИМП сохраняется после многократной переточки инструмента. Операция упрочнения выполняется на специализированных установках, легко осуществима технологически, не связана с присутствием токсичных сред и не требует значительных энергетических затрат и дополнительных производственных площадей.

По данным предприятий [11, 12], проводивших производственные испытания по оценке эффективности магнито-импульсной обработки инструмента (резцы, фрезы, сверла, метчики, развертки и др.), при резании различных материалов (жаропрочные сплавы, нержавеющие и конструкционные стали, стеклопластики и др.) стойкость инструмента после его упрочнения повышается, в среднем, в 1,3 ... 2,0 раза. Однако те же данные показывают, что в ряде случаев эффект обработки может приводить к более чем трехкратному повышению стойкости, отсутствовать либо проявляться в хрупкости быстрорежущей стали. Такой разброс результатов стойкостных испытаний потребовал выявить причины, из-за которых снижается эффективность упрочнения инструмента путем такой обработки.

**Выводы.** В заключение краткого анализа работ, выполненных по исследованию влияния магнитного поля на технологические характеристики режущих инструментов, следует отметить, что несмотря на большое их количество, они дают возможность лишь поверхностно судить о протекающих явлениях, режимах обработки, носят, подчас, рекламный характер, что не позволяет использовать их результаты для промышленного

применения. Применение метода магнитной и магнитно-импульсной обработки режущих инструментов и деталей машин, изготовленных из различных материалов, усложняется еще и тем, что для этого необходимы разработка и изготовление специальных установок в соответствии с габаритами и формой инструментов и деталей машин, которые будут подвергаться обработке.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чудновская Л. А. *Металловедение и термическая обработка металлов* / Л. А. Чудновская, М. Л. Бернштейн, Л. Г. Шевякова. – М., 1962. – № 6. – С. 36.
2. Димитров Л. П. Влияние намагнитиването на режущие инструмент верху трайността му. *Наука трудове*. Т. 13.2. св. / Л. П. Димитров // *Технология на машиностроение и металите*. – София : Земиздат, 1971. – С. 51.
3. Галей М. Т. Изучение влияния магнитного поля на стойкость быстрорежущего инструмента / М. Т. Галей, В. С. Ашихмин // *Станки и инструмент*. – 1981. – №4. – С. 31.
4. Галей М. Т. Повышение стойкости режущих инструментов путем магнитной обработки / М. Т. Галей // *Станки и инструмент*. – 1973. – № 5. – С. 31.
5. Влияние магнитного состояния быстрорежущих резцов на их стойкость / [Якунин Г. И. и др.]. – Изд. АНУ УССР. Сер. техн. наук. – 1967. – № 2. – С. 250.
6. Влияние намагнитченности резца и заготовки на их стойкость / [Якунин Г. И. и др.]. – Ташкентский политехнический институт : Сер. Машиностроение, изд. ФАН, 1966. – 96 с.
7. Якунин Г. И. Влияние термотока на стойкость быстрорежущего инструмента / Г. И. Якунин, Ф. Я. Якубов // *Труды Ташкентского политехнического института*, 1966. – Вып. 40. – С. 13-18.
8. Постников С. Н. Магнитная обработка быстрорежущего инструмента. В кн.: *Вопросы судостроения, серия технология и организация производства судового машиностроения* / С. Н. Постников, Ю. А. Бородин. – 1976. – Вып. 7. – С. 14-17.
9. Постников С. Н. Влияние импульсного магнитного поля на усталость быстрорежущих сталей / С. Н. Постников, А. Ф. Кунчик, А. А. Черников // *Электронная обработка материалов*. – 1981. – № 6. – С. 8-11.
10. Применение импульсного магнитного поля для упрочнения инструментов / [Постников С. Н. и др.] // *Обмен производственным и техническим опытом*. – 1987. – № 6. – С. 37-39.
11. Малыгин В. В. Магнитно-импульсная обработка штампов / В. В. Малыгин, Ю. Я. Вакуленко. – М. : Машиностроитель, 1984. – № 12. – С. 18.
12. Малыгин Г. В. Магнитное упрочнение сверл / Г. В. Малыгин, Ю. Я. Вакуленко. – М. : Машиностроитель, 1984. – № 3. – С. 84.

### **Скирденко О.І., Клевцов К.М., Шарко А.В., Михайлик В.Д. СТАН ПИТАННЯ ОБРОБКИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У МАГНІТНИХ ТА МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНИХ ПОЛЯХ**

*Одним з дуже простих методів підвищення зносостійкості ріжучих та інших видів інструментів є їх обробка в магнітних та магнітно-імпульсних полях. Така технологія не вимагає великих матеріальних витрат, мало енергоємна, але дозволяє підвищити його стійкість в 1,3 ... 1,5 рази.*

*Незважаючи на багаторічні дослідження впливу магнітних полів на фізико-механічні властивості інструментальних матеріалів, технологічні характеристики магнітнооброблених інструментів ще досліджені недостатньо. Особливо це стосується до спеціальних видів ріжучих та інших видів інструментів.*

*Мета роботи – встановити основні напрямки модифікації інструментальних матеріалів у магнітних та магнітно-імпульсних полях для поліпшення їх властивостей.*

*Слід зазначити, що, незважаючи на велику кількість напрямків модифікації матеріалів, вони дають можливість лише поверхово стверджувати про явища, режими обробки, що не дозволяє використовувати їх результати для промислового застосування. Застосування методу магнітної та магнітно-імпульсної обробки ріжучих інструментів і деталей машин, виготовлених з різних матеріалів, ускладнюється ще й тим, що для цього необхідні розробка та виготовлення спеціальних*

*установок відповідно до габаритів і форми інструментів та деталей машин, які будуть піддаватися обробці.*

**Ключові слова:** магнітна обробка, інструмент, матеріал.

**Skirdenko O.I., Klevtsov K.M., Sharco A.V., Mikhailik V.D. STATE OF THE QUESTIO OF TOOL MATERIALS PROCESSING IN MAGNETIC AND MAGNETIC PULSE FIELDS**

*One of very simple methods of improving durability of cutting and other tools is their processing in magnetic and magnetic pulse fields. This technology does not require high material costs; it is low energy-consuming, but it improves durability up 1.3 ... 1.5 times.*

*Despite many years of study of the effect of magnetic fields on the physical and mechanical properties of tool materials, technological characteristics of magnetically treated tools have not been adequately studied; in particular, this refers to special types of cutting and other types of instruments.*

*The aim is to determine the basic directions of tool materials modification in magnetic and magnetic pulse fields to improve their properties.*

*It should be noted that despite the large number of ways of materials modification, they just allow to judge superficially occurring phenomena, processing conditions; their results do not give use for industrial application. Practicing of magnetic and magnetic pulse treatment of cutting tools and machine parts made of different materials is complicated because it requires the development and manufacturing of special arrangements in accordance with the size and shape of tools and machine parts to be processed.*

**Keywords:** magnetic treatment, tool, material.

© Скирденко О.І., Клевцов К.М., Шарко А.В., Михайлик В.Д.

Статтю прийнято  
до редакції 29.09.14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАТЯЖКИ МЕМБРАНЫ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ НА ЕЕ ГЕОМЕТРИЮ

*Худяков И.В.*

*Херсонское мореходное училище рыбной промышленности,*

*Алексеев А.В.*

*Херсонская государственная морская академия*

*Рассматривается влияние величины силы затяжки на геометрию деформации мембраны амплитудного оптоволоконного датчика давления отражательного типа. Исследование проводилось методом конечных элементов, являющимся одним из основных инструментов, применяемых для моделирования датчиков и их элементов, в программном комплексе SolidWorks. Исследовано, как величина силы затяжки мембраны влияет на оптический зазор, который в свою очередь, влияет на основные характеристики датчика, такие, как: шумы, чувствительность, линейность характеристики и т. д. Установлено, что увеличение силы затяжки приводит к появлению нелинейности характеристик датчика в начальном диапазоне измерения, при этом с увеличением затяжки нелинейность усиливается. Это означает, что затяжку необходимо изменять в сторону уменьшения, однако, не нарушая герметичности датчика. Наиболее целесообразно с точки зрения получения линейной характеристики, для снятия сигнала – область, прилегающая к центру мембраны. В данной статье установлен характер нелинейности изменения оптического зазора, в зависимости от затяжки, что позволяет производить корректировку характеристик датчика.*

*Ключевые слова:* метод конечных элементов, амплитудный оптоволоконный датчик давления отражательного типа, мембрана, величина силы затяжки.

**Актуальность проблемы.** В амплитудных оптоволоконных датчиках давления (ОВДД) отражательного типа в качестве упругого чувствительного элемента (ЧЭ) применяются мембраны. К упругим ЧЭ предъявляются высокие требования по комплексу физических параметров: при сохранении стабильности упругих характеристик – малый гистерезис, малые остаточные деформации, малые температурные погрешности, циклическая прочность, геометрическая и коррозионная стойкости. Физические параметры упругих ЧЭ в основном определяются их материалами [1, 2].

Однако даже удачный выбор материалов не всегда позволяет получить требуемые характеристики ЧЭ ОВДД, т.к. в значительной степени эти характеристики определяются технологическим процессом изготовления данного прибора.

Несоответствие характеристик упругих ЧЭ можно разделить на:

- связанные с несовершенством упругих свойств материала;
- температурные, связанные с изменением величины модуля продольной упругости, линейных размеров, а также определяемые наличием градиента температур между измерительной точкой упругого элемента и местом заделки в корпус прибора;
- конструктивные, обусловленные формой ЧЭ и способом заделки в корпус прибора [3].

В рамках данного исследования рассматривается влияние конструктивных характеристик, а именно – силы затяжки мембраны при различном давлении измеряемой среды.

**Цель данной статьи** – определить влияние силы затяжки на деформации мембраны, изготовленной из прецизионного сплава 36НХТЮ, ОВДД отражательного типа и ее влияние на величину оптического зазора.

**Анализ литературных источников.** При изготовлении мембран, используемых в качестве упругого ЧЭ ОВДД отражательного типа, все шире применяются прецизионные сплавы, для которых имеются хорошие технологии обработки поверхности и формирования трехмерных структур. В литературе недостаточно сведений о проектировании ОВДД, в частности о технологическом процессе изготовления данного прибора.

Приводимые данные по конструктивным характеристикам носят оценочный характер (например, форма ЧЭ и способ заделки в корпус, влияние величины затяжки мембраны на оптический зазор) [3]. Выбор затяжки мембраны не связан с нелинейностью ее преобразовательной характеристики или метрологическими характеристиками датчика в целом. В имеющихся публикациях основное внимание уделяется форме мембран [4].

**Решение проблемы.** В рамках данного исследования был рассмотрен амплитудный ОВДД отражательного типа, предел намерений которого составляет от 0 до 30 МПа. Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в среде SolidWorks. Метод конечных элементов является одним из основных инструментов, применяемых для моделирования датчиков и их элементов [5–7].

Первый этап моделирования – построение объемной геометрической модели конструкции ОВДД. Второй этап – исследование статических характеристик. Завершающим этапом моделирования является непосредственное проведение расчетов и получение результатов.

Объемная модель конструкции датчика была разработана в пакете SolidWorks. Предварительно были созданы отдельные элементы конструкции датчика, а затем с помощью сопряжений они были объединены в сборку.

Конструкция датчика (рис. 1) состоит из нескольких частей. Через соединительный канал корпуса датчика (4) рабочее тело воздействует на мембрану (7), размещенную в корпусе (4), который имеет резьбовое соединение для крепления втулки (5) для прижима мембраны. Для стабилизации температурного режима датчика предусмотрена полость циркуляции охлаждающей жидкости в рубашке (6). В световой головке (2) располагается оптоволоконный жгут, по которому к мембране подводится световой сигнал от полупроводникового светоизлучателя и снимается отраженный сигнал с помощью светоприемника, которые так же расположены в световой головке (2).

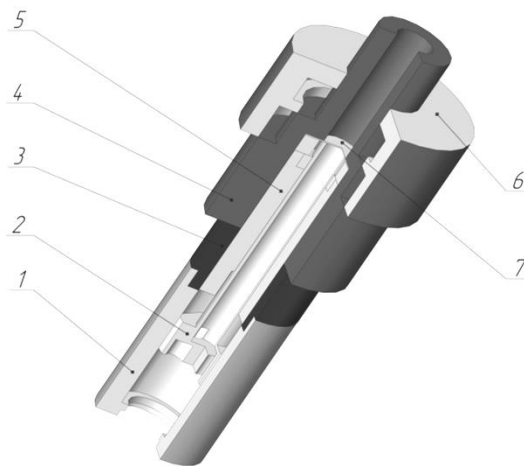


Рис. 1 – Трехмерная модель амплитудного ОВДД отражательного типа: 1 – кожух; 2 – световая головка; 3 – стакан; 4 – корпус; 5 – втулка; 6 – рубашка; 7 – мембрана

Для элементов сборки были заданы характеристики материалов. В расчете использовались справочные механические характеристики материалов. На границах элементов сборки заданы контактные условия, а на сами элементы «наложена» конечно-элементная сетка.

Последний предпроцессорный шаг построения модели – это наложение граничных условий. Так как модель рассчитывалась в симметричной постановке, закрепление на плоскость симметрии производилось таким образом, чтобы предотвратить перемещение ее точек по нормали и вращение вокруг осей, отличных от нормали.

Результатами исследования полученной модели являются оценки величины и формы прогиба мембраны при различных значениях силы затяжки и изменения измеряемого давления ОВДД.

Оценка геометрии прогиба мембраны при условии изменения силы затяжки и постоянного давления. С использованием полученной модели ОВДД, максимально приближенного к реальной конструкции, были проведены расчеты в программном комплексе SolidWorks. В результате были оценены величины прогиба мембраны для различных величин затяжки 4, 5, 6, 7, 8кН при дискретно изменяющемся давлении измеряемой среды в пределах 0...30 МПа с шагом 5МПа. Результаты исследования для каждого значения давления идентичные, на рис. 2 представлены результаты для давления 5 МПа.

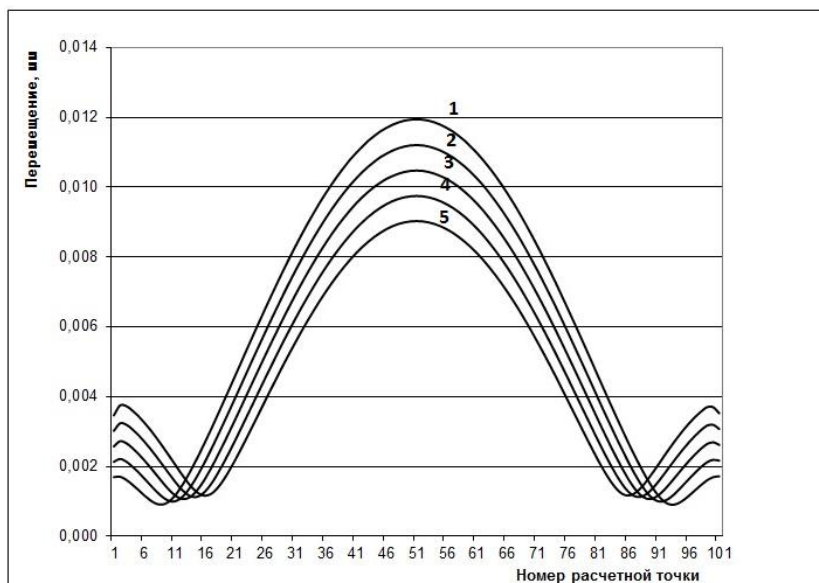


Рис. 2 – Эпюры напряженно деформированного состояния мембраны при различных силах затяжки, при постоянном давлении 5 МПа: 1 – 4кН; 2 – 5кН; 3 – 6кН; 4 – 7кН; 5 – 8кН

Для расчетных точек 5, 25, 51, что соответствует численному значению 0,495 мм, 2,475 мм, 5,049 мм от края защемленной части мембраны, оценена линейность функции изменения прогиба мембраны различной затяжки при условии постоянного давления. Результаты исследования также идентичны. На рис. 3 они представлены для расчетной точки 51, расположенной в центре мембраны.

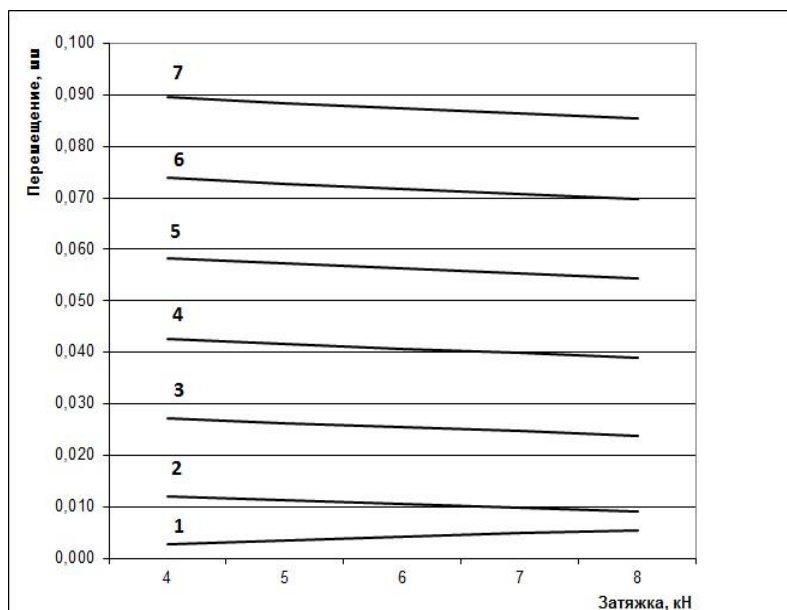


Рис. 3 – Прогиб мембраны для различных величин ее затяжки при постоянном давлении: 1 – 0 МПа; 2 – 5 МПа; 3 – 10 МПа; 4 – 15 МПа; 5 – 20 МПа; 6 – 25 МПа; 7 – 30 МПа

При отсутствии давления увеличение силы затяжки приводит к увеличению оптического зазора. Однако уже при давлении 5 МПа и выше изменение оптического зазора приобретает линейный характер, что можно объяснить ликвидацией прогиба по краям мембраны, возникающего вследствие напряженного состояния материала.

В результате затяжка приводит к нелинейности изменения оптического зазора в начале диапазона измерения давления. Чем больше затяжка, тем больше диапазон нелинейности.

Оценка геометрии прогиба мембраны при условии изменения давления и постоянной силы затяжки. Кроме исследования влияния затяжки, в программном комплексе SolidWorks производилась оценка прогиба мембраны для различных величин давления 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 МПа при дискретно изменяющейся силе затяжки 4...8 кН с шагом 1 кН. Результаты исследования для каждого значения затяжки идентичные, на рис. 4 представлены результаты для затяжки 4 кН.

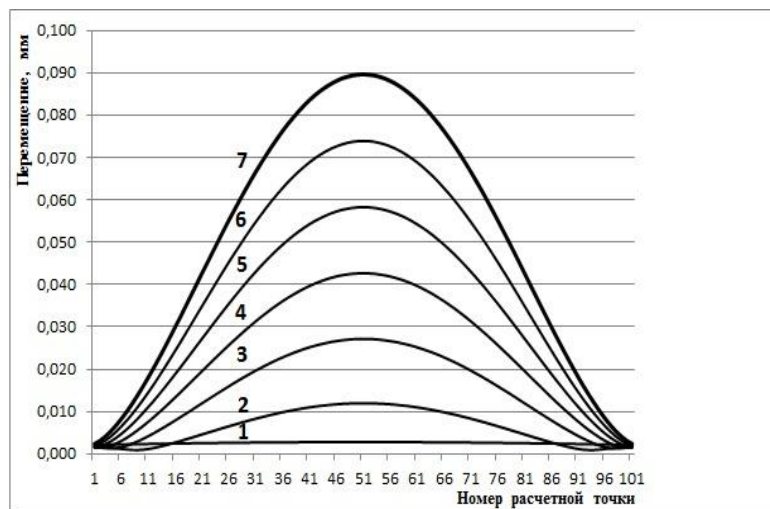


Рис. 4 – Эпюры напряженно деформированного состояния мембраны различного давления 0; 5; 10; 15; 20; 25; 30 Мпа, при постоянной затяжке 4 кН: **1** – 0 МПа; **2** – 5 МПа; **3** – 10 МПа; **4** – 15 МПа; **5** – 20 МПа; **6** – 25 МПа; **7** – 30 МПа

По аналогии с первым расчетом строим график изменения оптического зазора от величины затяжки для расчетных точек 5;25;51. Данный график представлен на рис. 5, где верхние линии семейств соответствуют затяжке 4 кН.

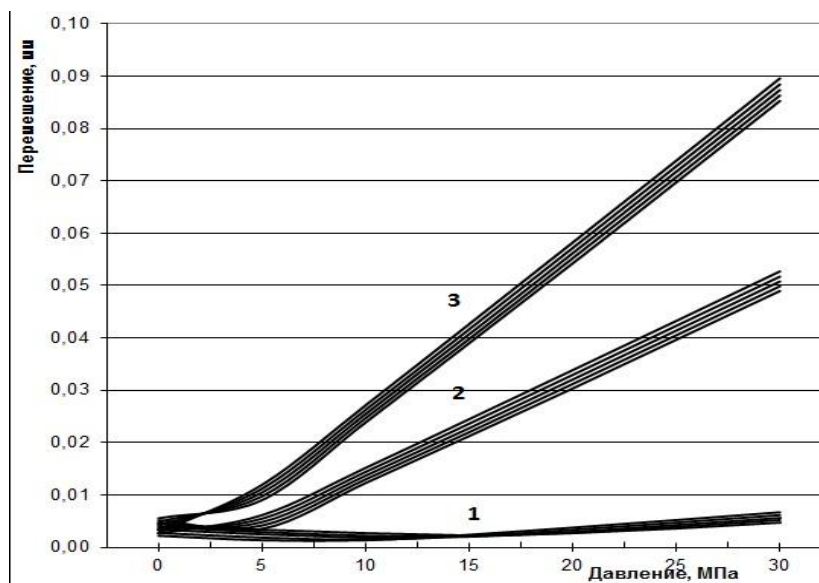


Рис. 5 – График изменения оптического зазора от величины затяжки для расчетных точек 5; 25; 51: **1** – семейство кривых для расчетной точки 1; **2** – семейство кривых для расчетной точки 25; **3** – семейство кривых для расчетной точки 51

Из графика на рис. 5 видно, что изменение оптического зазора в окрестностях расчетной точки 5 (0,495 мм) носит нелинейный характер, что можно объяснить наличием в этой зоне (по периферии мембраны) напряженного состояния, возникающего вследствие затяжки мембраны.

В окрестностях точек 25 (2,475 мм) и 51 (5,049 мм) наличие деформированного состояния приводит к тому, что в диапазоне измерения давления от 0 МПа до 5 МПа для точки 51 и от 0 МПа до 8 МПа для точки 25 изменение оптического зазора носит нелинейный характер. Причем величина нелинейности усиливается с увеличением силы затяжки мембраны.

Одна из основных задач, которая решается при проектировании мембраны, – получить ее упругую характеристику максимально близкой к линейной. Очевидно, чем меньше нелинейность, тем проще и дешевле регистрирующая электронная часть датчика, обрабатывающая сигнал.

Исходя из проведенного исследования, следует, что затяжку необходимо изменять в сторону уменьшения, однако, не нарушая герметичности датчика. Возможно применение ЧЭ в виде стакана, однако это очень сложно с точки зрения технологического процесса изготовления. Такой ЧЭ будет дорогостоящий. Либо возможно применять ЧЭ в виде мембраны и тарировать затяжку различными способами (прецизионное прилегание плоскостей, применение высокотемпературного герметика и т.д.)

**Выводы.** В результате исследования установлено:

- увеличение силы затяжки приводит к появлению нелинейности характеристик датчика в начальном диапазоне измерения, при этом с увеличением затяжки нелинейность усиливается;
- установлен характер нелинейности изменения оптического зазора в зависимости от затяжки, что позволяет производить корректировку характеристик датчика;
- наиболее целесообразным, с точки зрения получения линейной характеристики, для снятия сигнала – область, прилегающая к центру мембраны;
- затяжку необходимо изменять в сторону уменьшения, однако не нарушая герметичности датчика;
- при нулевом давлении величина прогиба мембраны в диапазоне затяжки от 4 кН до 8 кН, для расчетной точки 51, меняется от 0,0028 мм до 0,0057 мм.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тайманов Р. Е. Метрологический самоконтроль датчиков / Р. Е. Тайманов, К.В. Сапожникова // Датчики и системы. – 2011. – № 2. – С. 58-66.
2. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
3. Henry M. P. The Self-Validating Sensor: Rationale, Definitions and Examples / M. P. Henry, D. W. Clarke // Control Engineering Practice. – 1993. – Vol. 1, no. 4. – P. 585-610.
4. Xiao Z. Diaphragm deflection of silicon interferometer structures used as pressure sensors / Xiao Z., Engstrom O., Vidovic N. // Sensors and Actuators A. – 1997. – no. 58. – p. 99.
5. Богуш М. В. Анализ функции преобразования пьезоэлектрических датчиков давления методом конечных элементов / М. В. Богуш, Э. М. Пикалев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 2. – С. 74-84.
6. Козлов А. И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Одномембранные преобразователи / А. И. Козлов, А. В. Пирогов, В. М. Стучебников // Датчики и системы. – 2008. – № 1. – С. 6-11.
7. Козлов А. И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Двухмембранные преобразователи / А. И. Козлов, А. В. Пирогов, В. М. Стучебников // Датчики и системы. – 2009. – № 8. – С. 50-53.

**Худяков І.В., Алексєєв О.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕЛИЧИНИ ЗАТЯГУВАННЯ МЕМБРАНИ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТИСКУ НА ЇЇ ГЕОМЕТРІЮ**

*Розглядається вплив величини сили затягування на геометрію деформації мембрани амплітудного оптоволоконного датчика тиску відбивного типу. Дослідження проводилося методом кінцевих елементів, що є одним з основних інструментів, вживаних для моделювання датчиків і їх елементів, в програмному комплексі SolidWorks. Досліджено, як величина сили затягування мембрани впливає на оптичний зазор, який, у свою чергу, впливає на основні характеристики датчика, такі як: шуми, чутливість, лінійність характеристики і так далі. Встановлено, що збільшення сили затягування призводить до появи нелінійності характеристик датчика в початковому діапазоні виміру, при цьому із збільшенням затягування нелінійність посилюється. Це означає, що затягування необхідно змінювати у бік зменшення, проте не порушуючи герметичності датчика. Найбільш доцільно, з погляду здобуття лінійної характеристики, для зняття сигналу – область, прилегла до центру мембрани. У даній статті встановлений характер нелінійності зміни оптичного зазору, залежно від затягування, що дозволяє виробляти коректування характеристик датчика.*

**Ключові слова:** метод кінцевих елементів, амплітудний оптоволоконний датчик тиску відбивного типу, мембрана, величина сили затягування.

**Hudyakov I.V., Alekseev A.V. STUDY OF THE EFFECT OF TIGHTENING VALUES OF FIBER OPTIC PRESSURE SENSOR MEMBRANE ON ITS GEOMETRY**

*Effect of the tightening force on the geometry of membrane deformation of the amplitude fiber optic pressure sensor of the reflective type is considered. The study was conducted using finite element method, which is one of the main tools for simulating sensors and their elements in the software package SolidWorks. The influence of the magnitude of tightening force of membrane on the optical gate was investigated; which in turn affects the basic characteristics of the sensor such as noise, sensitivity, linearity and so on. It was discovered that increase in the tightening force leads to the appearance of non-linearity of sensor characteristics in the initial measuring range; high tightening increases non-linearity. This means that the tightness must be changed to decrease, however, without compromising sensor impermeability. The area adjacent to the center of membrane is regarded to be the most appropriate for the signal measuring, in terms of getting a linear characteristic. This article ascertains the nature of the nonlinear changes in the optical gate as a function of tightening; it allows to adjust the characteristics of the sensor.*

**Keywords:** finite element method, amplitude fiber-optic pressure sensor of the reflective type, membrane, value of tightening force.

© Худяков І.В., Алексєєв О.В.

Статтю прийнято  
до редакції 25.09.14



*ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ*

## ОНТОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ БАЗИ КАРТОГРАФІЧНИХ ДАНИХ ГІС ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

*Васюхін М.І., Ткаченко О.М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ,*

*Касім А.М., Іваник Ю.Ю., Долинний В.В.*

*Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, м. Київ*

*Останньою тенденцією в сфері прогресивних інформаційних технологій при розробці геоінформаційних систем різного призначення є впровадження комп'ютерної онтології як специфікації концептуалізації заданої предметної області. Придатність використання інформаційної онтології, яка залежить від цілей її створення, тобто завдань, під час вирішення яких планується її застосовувати, зумовлена необхідністю структурування великого обсягу інформації.*

*У статті запропоновано онтологічний підхід до побудови бази картографічних даних геоінформаційної системи прецизійного землеробства, який дасть змогу спростити її структуру та процес формування запиту до неї, скоротити час відповіді системи, при цьому не зменшуючи інформаційне навантаження та розміри масиву картографічних даних. Представлено формалізований опис концептуальної частини бази картографічних даних у вигляді онтологічної моделі, яка об'єднує три онтологічні підмоделі картографічних даних – тематичну, графічну і просторову – і яка виступає посередником між людино- і машинно-орієнтованим рівнями подання картографічної інформації.*

*Ключові слова:* онтологія, база даних, геоінформаційна система, онтологічна модель даних, прецизійне землеробство, картографічна інформація.

**Вступ.** Сьогодні у нашій країні особливої актуальності набуває проблема інформатизації та ефективності управління у сільському господарстві, а отже підвищення рентабельності та продуктивності аграрного сектору економіки. У таких країнах, як США, Канада, ФРН та Великобританія, ця проблема успішно вирішується за допомогою технологій прецизійного землеробства, одним з яких є геоінформаційні системи (ГІС) як інструмент достовірного моніторингу та оперативного управління станом сільсько-господарських угідь. Основна функція ГІС для прецизійного землеробства (ПЗ) – введення, обробка, зберігання і виведення за запитами оператора різноманітних картографічних даних і спеціальних відомостей про певну місцевість та динамічні рухомі об'єкти, що здійснюють поточну господарську діяльність. Така інформація повинна бути закладена в базах картографічних даних (БКД), що можливо лише тоді, коли вони побудовані з урахуванням методів цифрової картографії, а також у базах символічних даних, що містять актуальну просторово-часову інформацію про стан рухомих об'єктів.

**Постановка проблеми.** Процес проектування БКД являє собою складний процес опису елементів предметної області (ПрО), їх зв'язків та інтерпретації або візуалізації на екрані оператора геоінформаційної системи:

«ПрО» <-> «Схема внутрішньої моделі БКД».

Результати аналізу показали, що великі масиви графічної інформації зручно структурувати та моделювати за допомогою системного підходу В. М. Глушкова [1], його модифікації – структурно-функціонального підходу [2] та інформаційно-структурного способу [3].

Для побудови БКД за допомогою цих методів використовувався вітчизняний формат зберігання даних Ф1, а також його наступні модифікації (Ф20 й F20S) [2]. Перевагою цього формату є відносна простота і наочність, можливість формувати записи та зв'язки самому розробнику. Проте його суттєвим недоліком є надмірність даних та їх великий розмір, а головним є те, що цей формат базується на представленні форми Землі у вигляді еліпсоїда Красовського, який, згідно новітніх космічних досліджень, втратив свою актуальність. Незважаючи на істотну економію обчислювальних ресурсів, яка досягається в його модифікованих варіантах, використання зазначених форматів зберігання породжує

бази, що представляють собою величезні масиви, які містять велику надлишковість даних, що призводить до значних часових витрат на пошук, обробку і відображення необхідної картографічної інформації [2, 4–6].

На сьогоднішній день удосконалення механізмів пошуку за ключовими словами і формальних мов запитів не рятує від високого рівня інформаційного шуму і неповноти одержуваних результатів [7]. Ідеальним рішенням було б формулювання запитів на природній мові. Однак прийнятних методів, що реалізують такий підхід, у даний час немає. Використання онтології дозволяє точніше інтерпретувати зміст термінів, що фігурують у запиті, а також доповнювати або розширювати запит поняттями, які пов'язані з термінами запиту відношеннями рід-вид, синонім, частина-ціле, асоціація та ін. (рис. 1).

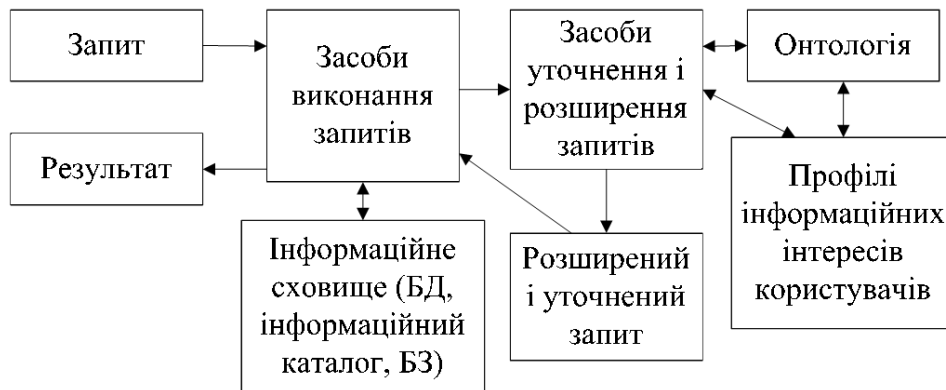


Рис. 1 – Використання онтології для організації ефективного пошуку в інформаційному сховищі

З іншого боку, в сучасних інформаційно-пошукових системах і пошукових машинах Internet онтології використовуються для уточнення сенсу запитів шляхом «фільтрації» їх змісту, що сприяє зменшенню інформаційного шуму [7]. При цьому застосовуються процедури формування так званих профілів інформаційних інтересів користувачів і процедури семантичного перетину запиту або інформації, приготовленої до видачі, з цими профілями. У першому випадку семантичне подання запиту, розширене за допомогою онтології, зіставляється з профілем інформаційних інтересів, «фільтрується» і передається пошуковій машині, а у другому випадку «фільтрації» піддається не запит, а результат його виконання, тобто знайдена по ньому інформація.

**Метою статті** є розробка онтологічної моделі бази картографічних даних для ГІС прецизійного землеробства.

**Основний зміст.** Для розв'язання задачі формування концептуальних «прозорих» подань для слабоструктурованих предметних областей застосовуються онтології як провідна парадигма структурування інформаційних потоків. Оскільки поняття онтології запозичене із філософії, то дуже важливо дати його чітке визначення у сфері технічних наук. Можна сказати, що онтологія – формальний явний опис понять (класів) в аналізованій предметній області, властивостей кожного поняття, що описують різні характерні атрибути поняття (слотів), і обмежень, накладених на слоти (фацетів). Онтологія разом з набором індивідуальних примірників класів утворює базу знань (БЗ). Насправді, важко визначити, де закінчується онтологія і починається БЗ. Онтологія включає формулювання основних понять ПрО і відношення між ними, що дає можливість їх подальшої машинної інтерпретації. Різні дослідники формулюють свої часткові визначення онтології ПрО, відповідно до конкретної області їх професійних інтересів [8, 9]. Тематика і практична спрямованість наших досліджень (онтологія як засіб моделювання ГІС ПЗ) зумовлює наступне визначення комп'ютерної онтології. Комп'ютерна онтологія ПрО ГІС ПЗ – це ієрархічна структура кінцевої множини понять, що описують геоінформаційну систему ПЗ та охоплюють просторові, графічні і семантичні аспекти БКД і динамічних сцен поточної обстановки у спостережуваній частині простору (для останніх також враховується часовий аспект).

Класи об'єктів онтології в середовищі ГІС відповідають прошкам тематичної карти, рис. 2, а самі інформаційні об'єкти, що входять до відповідного класу, – об'єктам прошарку. Завдяки об'єднанню різних типів баз даних в онтології атрибути об'єктів можуть бути представлені не лише у табличному вигляді, а й у текстовому, а також у вигляді гіперпосилань на розподілені в мережі інформаційні ресурси.

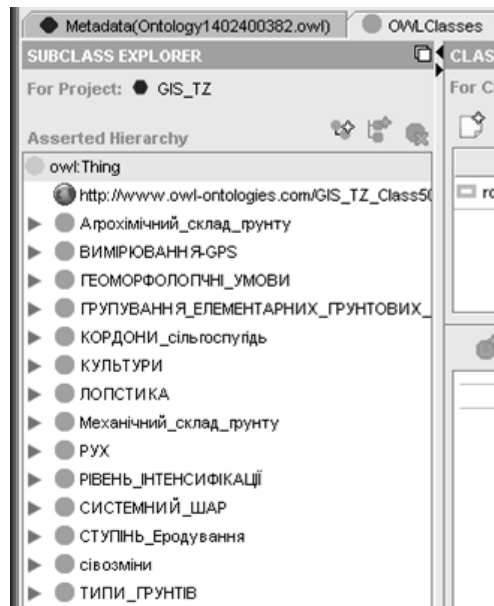


Рис. 2 – Ієрархія класів ПроО ГІС ПЗ, спроектованих в редакторі Protege

Виділені концепти БКД розміщуються у вузлах онтографа. Розташований на найвищому рівні концепт є головним і містить ідентифікатор описуваного об'єкта. Детальні властивості інформаційного об'єкта розкриваються в ієрархії описів нижчих, підлеглих концептів. Для навігації в такій деревоподібній моделі кожен концепт має ключовий слот, що однозначно визначає шлях доступу до його даних.

На першому рівні розташований головний концепт, що містить ідентифікатор картографічного зображення визначеного району (модельованої території), який визначає вид карти, її масштаб і тип картографічної проекції. Концепти другого рівня визначають розбивку карти заданого району на планшети по складових міні-районів. Кожен планшет розкривається на третьому рівні у вигляді сукупності концептів, що представляють різні прошарки опису його міні-району по класах картографічних об'єктів. У середині кожного прошарку визначаються картографічні об'єкти за видами описуваних компонентів, при чому певні прошарки опису можуть включати сукупність концептів четвертого рівня, які, в свою чергу, представлені своїми компонентами. На п'ятому рівні розташовуються концепти, які безпосередньо описують просторові характеристики конкретних компонентів у кожному мікрорайоні, при цьому у кожному такому концепті виділяється два типи слотів: метричні і семантичні. Перший тип представляє координати точок, ліній чи площ, які задають просторові характеристики описуваного компонента, а другий тип – змістовний опис цього компонента.

Відомо, що онтологію  $O$  як формальний опис деякої предметної області, незалежно від її дійсної природи, можна подати у вигляді:

$$O = \langle X, R, F \rangle,$$

де  $X$  – кінцева множина концептів (термінів, понять, квантів знань) заданої ПроО, при цьому  $X \neq \emptyset$ ;  $R$  – кінцева множина відношень між концептами;  $F$  – множина функцій інтерпретації, заданих на концептах чи відношеннях.

Схема взаємодії цих множин та функціонування БКД, побудованої за допомогою онтологічного підходу, подана на рис. 3.

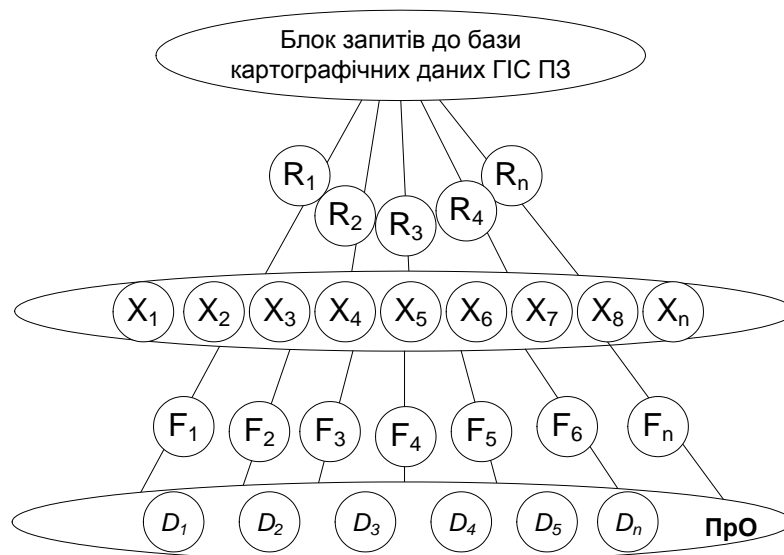


Рис. 3 – Схема запитів до ПрО при онтологічному підході

Множина концептів ПрО  $X$  групується у вигляді підмножини:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_q\}, \quad q = 1, 2, \dots, Q$$

за родовидовою та іншими ознаками.

Отже, нехай  $\epsilon$  – множина об'єктів, що виділяються у складі зображення кадру динамічного сценарію з точки зору інформаційного змісту, характеру обробки і візуалізації [3, 10, 11]:

$$X = \{x_i / i \in I\},$$

де  $x_i$  –  $i$ -й об'єкт;  $I$  – множина індексів об'єктів. При цьому кожен елемент множини описується у вигляді деякого кортежу:

$$x_i = \langle d_{i_1}, d_{i_2}, \dots, d_{i_n} \rangle; \quad d_{i_1} \in \text{Dom}(A_{i_1}), \quad d_{i_2} \in \text{Dom}(A_{i_2}), \dots; \quad d_{i_n} \in \text{Dom}(A_{i_n}),$$

де  $d_{i_n}$  –  $n$ -й елемент кортежу, значення якого описує  $i$ -й примірник множини об'єктів  $X$ ;  $A_{i_n}$  – ім'я атрибута, який відповідає  $n$ -му елементу кортежу;  $\text{Dom}(A_{i_n})$  – область значень атрибута з ім'ям  $A_{i_n}$ .

Причому, в моделі прийнято, що атрибути відповідно до виділених класів можуть бути трьох типів тематичні, графічні та просторові [3, 10, 11]:

$$\begin{aligned} At^T &= \{(A_i^T, \text{Dom}(A_i^T)) \mid i \in I\}, \\ At^G &= \{(A_j^G, \text{Dom}(A_j^G)) \mid j \in J\}, \\ At^P &= \{(A_k^P, \text{Dom}(A_k^P)) \mid k \in K\}. \end{aligned}$$

де:  $A_i^T$  –  $i$ -е ім'я множини тематичних атрибутів  $At^T$ ;  $A_j^G$  –  $j$ -е ім'я множини графічних атрибутів  $At^G$ ;  $A_k^P$  –  $k$ -е ім'я множини просторових атрибутів  $At^P$ ;  $I, J, K$  – відповідно множина індексів тематичних, графічних і просторових атрибутів.

З позиції системно-онтологічного підходу зображення кадру динамічного сценарію є інтерпретацією множини  $X$  і представляє сукупність множин даних, різних за своєю фізичною природою і функціональним значенням. Відповідно до цього, можна записати:

$$f_{\text{тип}} : X \rightarrow \text{Тип},$$

де  $\text{Тип}$  – множина типів даних,  $f_{\text{тип}}$  – відображення (інтерпретація).

Так, для статичної картографічної інформації та динамічної інформації, що використовується для подання об'єкта, що постійно змінює своє місцезнаходження, в БД можна виділити три категорії даних:

$$\text{Тип} = \{\text{тип}_h \mid h = 1, 3\}.$$

Тоді, виходячи зі сказаного, можна записати:

$$X = \{TO, GO, PO\},$$

де  $TO, GO, PO$  – відповідно набори класів тематичних, графічних і просторових об'єктів.

При цьому кожен суміжний клас розбиття  $X$  описується своєю підмножиною атрибутів, які не перетинаються між собою:

$$At^T \cap At^G \cap At^P = \emptyset.$$

Зв'язки та розподіл класів об'єктів у множини графічних, тематичних і просторових даних вважаємо онтологічною множиною відношень  $R$  між концептами  $X$ .

Розглянемо картографічні взаємозв'язки між елементами тематичної, графічної і просторової моделей даних. Введення зв'язків між тематичними і просторовими даними дозволяє: по-перше, здійснити строгу прив'язку всіх  $TO$  до світової системи координат, по-друге, описавши масштабні зв'язки між  $TO$  і  $PO$ , здійснювати логічне масштабування автоматично, по-третє, за допомогою цих зв'язків узагальнити  $TO$  по зонах, що, на нашу думку, підвищить швидкість вибірки графічних даних при побудові картографічного зображення, що складається із зон. Крім того, зв'язок між тематичною та графічною моделями дозволить враховувати особливості візуальних характеристик картографічних даних для кожного масштабу.

Таким чином, онтологічна модель бази картографічних даних може бути представлена у наступному вигляді [3, 10, 11]:

$$O^{MDB} = \langle O^T, O^G, O^P, H^O, R, At^R, H^R, H^{RA}, f_O^{H^O}, f_R^H, f_{RA}^H, f_C^C \rangle,$$

де  $O^T, O^G, O^P$  – онтології відповідно тематичних, графічних і просторових картографічних даних;  $H^O$  – власні характеристики онтологічної моделі БКД, що включають, наприклад, тип проєкції, тип карти, масштаби тощо;  $R$  – сукупність картографічних зв'язків між тематичними, просторовими і графічними даними;  $At^R$  – атрибути картографічних зв'язків;  $H^R, H^{RA}$  – набори інтегральних характеристик, відповідно до картографічних зв'язків та їх атрибутів;  $f_O^{H^O}$  – відображення, що задає характеристики онтологічної моделі;  $f_R^H, f_{RA}^H$  – відображення, що визначають взаємозв'язки між картографічними зв'язками, їх атрибутами і відповідними конкретними наборами інтегральних характеристик;  $f_C^C$  – відображення, що визначає співвідношення між класами об'єктів, що присутні в картографічних зв'язках.

Модель бази картографічних даних, побудована на основі онтологічного підходу, базується на представленій диференціації опису об'єктів, що дозволяє уявити процес онтологічного проєктування ПрО у вигляді композиції результатів проєктування окремих підобластей. У цьому випадку процес проєктування бази картографічних даних є сукупністю оптимізаційних підпроцесів проєктування по кожній онтологічній моделі даних, що визначаються як виділені підобласті. Оптимальне рішення шукається на основі локальної оптимізації, що призводить до підвищення якості організації бази картографічних даних, онтологічна модель якої об'єднує три онтологічні підмоделі картографічних даних: тематичну, графічну і просторову.

**Висновки.** Запропоновано онтологічний підхід до побудови бази картографічних даних, який дасть змогу спростити її структуру та процес формування запиту до неї, скоротити час відповіді системи, при цьому не зменшуючи інформаційне навантаження та розміри масиву картографічних даних. Представлено формальний опис концептів бази картографічних даних і відношень між ними як композиція онтологій тематичних, графічних та просторових картографічних даних. Очікувані перспективи від використання запропонованої онтологічної моделі можна розділити на наступні категорії:

- поліпшення взаємодії розробників та програмних агентів ГІС ПЗ;
- уніфікація обміну картографічними даними;
- формалізація процесів специфікації, підвищення надійності і забезпечення багаторазовості використання концептуалізації Про ГІС ПЗ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Глушков В. М. Введение в АСУ / В. М. Глушков. – К. : Техника, 1974. – 319 с.
2. Васюхин М. И. Основы интерактивных навигационно-управляющих геоинформационных систем : монография / М. И. Васюхин. – К. : Лири-К, 2006. – 536 с.
3. Креденцар С. М. Методы и средства построения зрительных образов динамической обстановки в аэронавигационных геоинформационных системах реального времени : дис. ... кандидата техн. наук: 05.13.06 / Креденцар Светлана Максимовна. – К., 2010. – 217 с.
4. Гинзбург В. М. Формирование и обработка изображений в реальном времени: Методы быстрого сканирования / В. М. Гинзбург. – М. : Радио и связь, 1986. – 232 с.
5. Демьяненко В. Ю. Программные средства создания и ведения баз данных / В. Ю. Демьяненко. – М. : Финансы и статистика, 1984. – 127 с.
6. Тиори Т. Проектирование структур баз данных / Т. Тиори, Дж. Фрай. – М. : Мир, 1985. – 320 с.
7. Башмаков А. И. Интеллектуальные информационные технологии : учеб. пособие / А. И. Башмаков, И. А. Башмаков. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 304 с.
8. Палагин А. В. Системная интеграция средств компьютерной техники : монография / А. В. Палагин, Ю. С. Яковлев. – Винница : «Універсум-Вінниця», 2005. – 680 с.
9. Палагин А. В. Онтологические методы и средства обработки предметных знаний : монография / А. В. Палагин, С. Л. Крытый, Н. Г. Петренко. – Луганск : изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. – 324 с.
10. Касім А. М. Методи та засоби формування динамічних сценаріїв в навігаційно-керувальних комплексах : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Касім Аніса Мохаммадівна. – К., 2013. – 217 с.
11. Капштык О. И. Методы и технологические средства представления и анализа воздушной обстановки в геоинформационных системах оперативного управления : дис. ... кандидата техн. наук: 05.13.06 / Капштык Олег Иванович. – К., 2010. – 228 с.

**Васюхин М.И., Ткаченко А.Н., Касим А.М., Иваник Ю.Ю., Долинный В.В. ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ БАЗЫ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ГИС ПРЕЦИЗИОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

*Последней тенденцией в сфере прогрессивных информационных технологий при разработке геоинформационных систем различного назначения является внедрение компьютерной онтологии как спецификации концептуализации заданной предметной области. Пригодность использования информационной онтологии, которая зависит от целей ее создания, то есть задач, при решении которых планируется ее применять, обусловлена необходимостью структурирования большого объема информации.*

*В статье предложен онтологический подход к построению базы картографических данных геоинформационной системы прецизионного земледелия, который позволит упростить ее структуру и процесс формирования запроса к ней, сократить время ответа системы, при этом не уменьшая информационную нагрузку и размеры массива картографических данных. Представлено*

*формализованное описание концептуальной части базы картографических данных в виде онтологической модели, которая объединяет три онтологические подмодели картографических данных – тематическую, графическую и пространственную – и которая выступает посредником между человеко- и машинно-ориентированным уровнями представления картографической информации.*

**Ключевые слова:** онтология, база данных, геоинформационная система, онтологическая модель данных, прецизионное земледелие, картографическая информация.

**Vasukhin M.I., Tkachenko O.M., Kasim A.M., Ivanyk I.I., Dolinniy V.V.** THE ONTOLOGICAL APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF MAP DATABASE OF GIS FOR PRECISION FARMING

*The latest trend in the field of advanced information technology at the design stage of geoinformational systems for different purposes is the introduction of computer ontology as a specification of conceptualization of a given domain. The suitability of the use of information ontology, which depends on the objectives of its creation, that is, tasks, at the decision of which it is planned to apply it, is determined by the necessity of structuring a large amount of information.*

*The article suggests the ontological approach to the construction of map database of geographic information system for precision agriculture, which will give the opportunity to simplify its structure and process of forming a query to it, to reduce the response time of the system, without reducing the information overload and the dimensions of the mapping data array. The formalized description of conceptual framework of cartographic data is presented as ontological model that unites three ontological submodels of cartographic data – thematic, graphic and spatial –and which mediates between human- and machine-oriented representation levels of map information.*

**Keywords:** ontology, database, geographic information system, ontological data model, precision farming, mapping information.

© Васюхін М.І., Ткаченко О.М., Касім А.М., Іваник Ю.Ю., Долинний В.В.

Статтю прийнято  
до редакції 21.06.14

УДК: 629.056.6: 629.056.8 (045)

## ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОБРАХУНКІВ ІНТЕГРОВАНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЗА РАХУНОК ЕКОНОМНОГО МЕТОДУ ОБЕРТАННЯ МАТРИЦЬ

*Ільницька С.І.*

*Національний авіаційний університет, м. Київ*

*Не зважаючи на велику кількість публікацій, присвяченим інтегрованим навігаційним системам та методам обертання матриць, мало уваги приділяється технічним аспектам питання швидкодії таких систем. Основною метою даної роботи є дослідження можливостей підвищення швидкодії обрахунків в інтегрованій навігаційній системі шляхом використання покращеної процедури обертання трикутних матриць. В результаті практичної реалізації методів Гауса, Жордана-Гауса та запропонованого методу обертання трикутної матриці у вигляді функцій у програмному середовищі Code Warrior на мікропроцесорі із серії Freescale Kinetis K-60 було визначено, що порядок точності зберігається приблизно таким же для всіх методів, а за швидкодією запропонований метод дає вигоди приблизно у 70–80 % у порівнянні з класичними методами Гауса та Жордана-Гауса відповідно. Дані результати можуть також бути використані при програмуванні алгоритмів інтегрованих навігаційних систем у конкретному апаратному забезпеченні. Зокрема, в нашому випадку було вирішено зупинитися саме на запропонованому методі обертання трикутних матриць.*

*Ключові слова:* інтегровані навігаційні системи, метод обертання трикутних матриць.

**Вступ.** Останні роки значна увага приділяється дослідженням та розробці відносно дешевих та малогабаритних навігаційних систем для використання в автомобілях, водних суднах, безпілотних літальних апаратах тощо. Важливе місце серед сучасних навігаційних систем займають глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), що включають глобальну систему позиціонування GPS (США), глобальну навігаційну супутникову систему ГЛОНАС (Росія) та у перспективі – GALILEO (Європейський Союз). Це пояснюється високою точністю визначення часу, просторових координат, складових швидкості та глобальністю робочої зони. Проте, якщо крім координат і швидкостей необхідно забезпечити ще визначення параметрів орієнтації з високою частотою оновлення даних, бажано використовувати ГНСС у поєднанні з іншими системами. Комплексна обробка даних в інтегрованій навігаційній системі забезпечить її відповідність вимогам за точністю, доступністю, надійністю та цілісністю [1–4].

**Актуальність досліджень.** Інтегровані інерціально-супутникові навігаційні системи широко використовуються у світовій практиці через те, що вони працюють на різних фізичних принципах і дуже добре доповнюють одна одну. В результаті отримується інтегрована навігаційна система з розширеним набором навігаційних параметрів, високою частотою оновлення даних, хорошою коротко- та довготривалою точністю, підвищеною завадостійкістю, надійністю та цілісністю [3–6]. Отже, розробка та дослідження таких систем, і зокрема питання підвищення швидкодії їх роботи, є вельми актуальним питанням на даний час.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наявних публікаціях немає інформації щодо специфічних методів обертання матриць в розрахунках інтегрованих навігаційних систем, особливо із вказуванням конкретного апаратного забезпечення, де ці розрахунки реалізовано. Є окремі публікації, присвячені методам обертання матриць. Зокрема, у роботі [7] представлено спосіб обертання матриці з використанням методу Холецкого декомпозиції матриці. В іншій роботі [8] пропонується ітеративний алгоритм обертання матриць сьомого порядку, який розроблено спеціально для дуже погано обумовлених матриць, і який дає досить непогану точність обрахунків. Проте в даних публікаціях не зазначено, з якою ефективністю дані методи можуть бути впроваджені у сучасних мікропроцесорах.

**Постановка задачі.** В даній роботі ставиться задача по аналізу можливостей підвищення швидкодії обчислень в інтегрованій навігаційній системі шляхом використання покращеної процедури обернення матриць та її апробації з використанням мікропроцесора Freescale Kinetis K-60.

**Аналіз існуючих методів обернення матриць.** Обернення матриць може здійснюватись з використанням багатьох різних методів, які можна поділити на два підвиди – прямі та ітеративні методи [9].

**Прямі методи** приводять до точного рішення після виконання певної кількості кроків. Проте таке твердження є справедливим лише для випадків, коли у нас є безкінечна точність. А оскільки в обчисленнях використовується обмежена точність, то і рішення виходять приблизними і чутливими до похибок округлення. Ефект таких неточностей значно посилюється в задачах, де виконується багато різних маніпуляцій з матрицями.

**Ітеративні методи**, з іншого боку, покращують наступні наближення до тих пір, доки рішення не зійдеться до бажаного результату. Ітеративні методи широко використовуються для матричних обчислень, особливо для великих систем, оскільки ці методи є більш простими, робастними до чисельних похибок, і потребують менше пам'яті у порівнянні із прямими методами. Проте швидкість збіжності залежить від точності початкового наближення. Слід зазначити, що рішення, отримане за допомогою ітеративних методів, теж є приблизним, проте ефект похибок заокруглення тут є мінімальним.

Розглянемо деякі із *прямих методів* обернення матриць.

Для реалізації першого методу потрібно виконати таку послідовність дій:

1) Знайти визначник матриці  $A$  і переконатись, що  $\Delta A \neq 0$ , тобто матриця  $A$  не вироджена.

2) Скласти алгебраїчні доповнення матриці  $A_j$  до кожного елемента матриці  $A$  і записати матрицю  $A^* = A_j$  з отриманих алгебраїчних доповнень.

3) Записати обернену матрицю відповідно до формули:  $A^{-1} = \frac{1}{\Delta A} \cdot (A^*)^T$ .

Слід зазначити, що даний метод знаходження оберненої матриці не є оптимальним для реалізації на комп'ютері, а при здійсненні обчислень вручну є більш-менш зручним для матриць відносно невеликих порядків.

Для інших двох способів потрібно спочатку скласти розширену матрицю  $C$ , що має такий вигляд:  $C = [A \ E]$ , де  $E$  – одинична матриця того ж розміру, що і матриця  $A$ . Після цього за допомогою елементарних перетворень, що виконуються з рядками розширеної матриці, необхідно привести розширену матрицю до вигляду  $[E \ A^{-1}]$ , тобто зробити так, щоб матриця справа стала оберненою до початкової матриці  $A$ . До елементарних перетворень, які можуть тут бути застосовані, відносяться такі дії: зміна місць двох рядків; множення всіх елементів рядка на деяке число, що не дорівнює нулю; додавання до елементів одного рядка відповідних елементів іншого рядка, помножених на будь-який множник. Застосовувати перераховані елементарні перетворення можна різними способами. Розглянемо два найбільш поширені методи обернення матриць: Гауса і Жордана-Гауса.

Для застосування метода Гауса зручно, коли перший елемент першого рядка розширеної матриці дорівнює одиниці. Тому якщо є рядок, у якого перший елемент дорівнює одиниці, він міняється місцями з першим рядком. Якщо ж ні, то елементи першого рядка просто діляться на значення його першого елемента. Взагалі метод Гауса поділяється на два етапи: прямий хід (коли елементи під головною діагоналлю матриці стають нульовими) і зворотній хід (коли елементи над головною діагоналлю матриці стають нульовими). Більш детально про даний метод можна подивитись у [10, 11].

Метод Жордана-Гауса, на відміну від метода Гауса, здійснюється в один етап. Даний метод складається з таких дій: 1) послідовно обираються ключові елементи, що

лежать на головній діагоналі матриці. Рядок  $i$  стовпчик розширеної матриці, на перетині яких знаходиться ключовий елемент, вважаємо також ключовими; 2) усі елементи ключового рядка діляться на ключовий елемент; 3) перетворення ключового стовпчика в одиничний з одиницею на місці ключового елемента. Одиничним вважається той стовпчик, у якого один елемент дорівнює одиниці, а всі інші є нульовими. Більш детально про метод Жордана-Гауса можна подивитись у [10, 11]. Принциповою його перевагою є стабільність. Недоліком є те, що він потребує зберігання двох матриць та маніпуляцій над ними одночасно. Щоправда, цей недолік відноситься також і до метода Гауса.

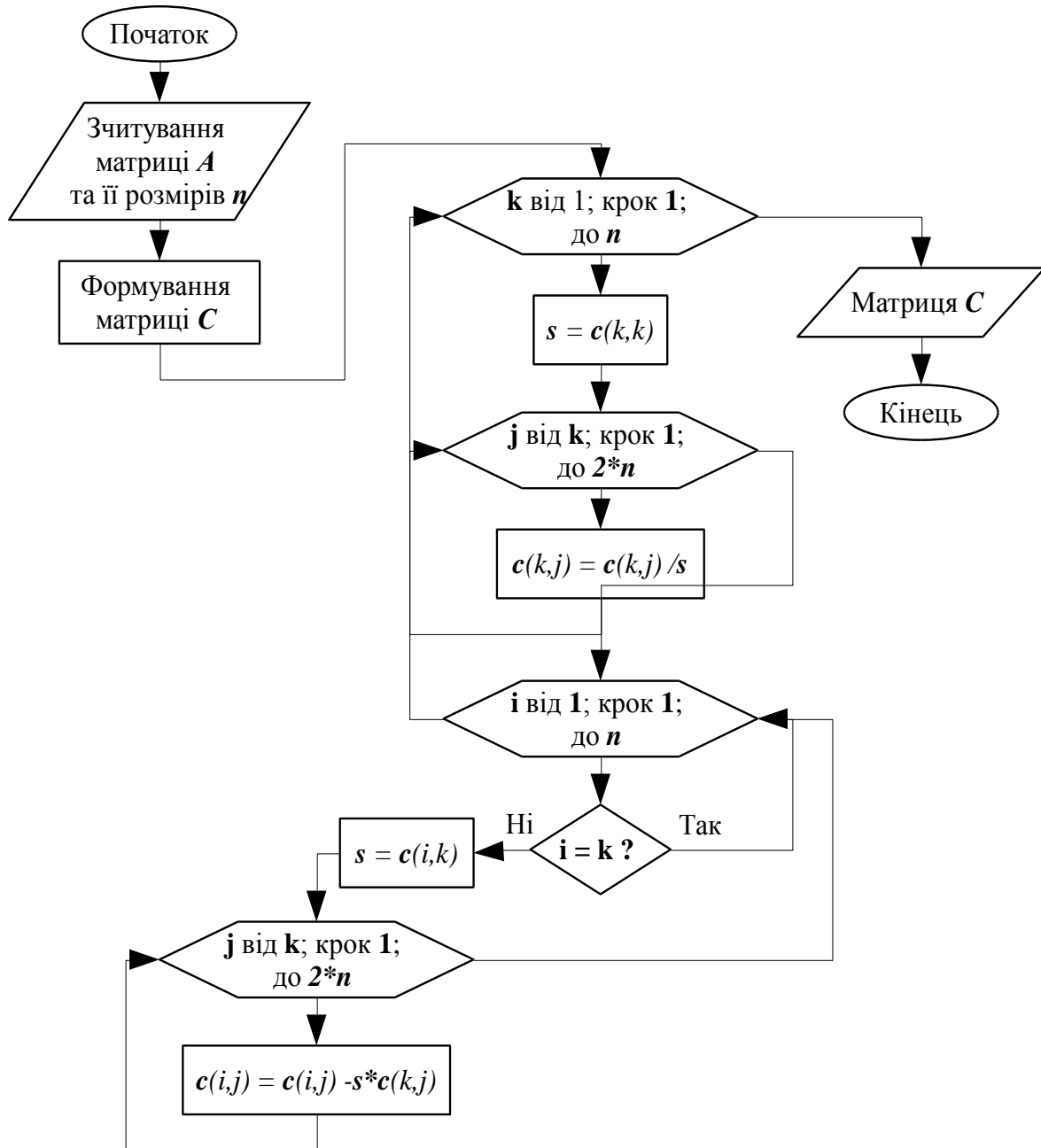


Рис. 1 – Блок-схема алгоритму обернення матриці за методом Жордана-Гауса

**Рівняння інтегрованої навігаційної системи.** Інтегрована навігаційна система функціонує таким чином, що спочатку обраховується рішення в безплатформній інерціальній навігаційній системі (БІНС), а потім воно коригується з використанням даних глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) та інших датчиків [5, 12, 13]. Розглянемо більш детально момент корекції БІНС, оскільки саме там виконується процедура обернення матриці.

Вхідними даними блока коригування є дані про координати, швидкість та орієнтацію від БІНС, дані про координати та швидкість від ГНСС, матриця вимірювань і коваріаційні матриці похибок БІНС та ГНСС. Вихідними даними є оптимальні оцінки координат, швидкості та орієнтації об'єкта.

Запишемо спочатку рівняння фільтра Калмана. Вектори похибок БІНС позначимо так:  $\mu$  – вектор малого повороту похибки визначення орієнтації,  $\delta \mathbf{v}, \delta \mathbf{r}$  – вектори похибок визначення швидкості та координат об'єкта. Вектор повного прискорення позначимо як  $\tilde{\mathbf{a}} = [\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \tilde{a}_3]^T$ . Рівняння зміни похибок БІНС беремо в такій формі [13]:

$$\dot{\mathbf{x}} = F\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mu \\ \delta \mathbf{v} \\ \delta \mathbf{r} \end{bmatrix}$ ,  $F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}$ ,  $C = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{a}_3 & \tilde{a}_2 \\ \tilde{a}_3 & 0 & -\tilde{a}_1 \\ -\tilde{a}_2 & \tilde{a}_1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{n}$  – вектор випадкових похибок

роботи БІНС;  $0, I$  – нульова та одинична матриці розмірністю  $3 \times 3$ . Дискретний аналог рівняння (1) через малий інтервал часу  $\Delta t$  має такий вигляд:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k; \quad \Phi_k = I + F\Delta t + \frac{(\Delta t)^2}{2} F^2 = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ C \cdot \Delta t & I & 0 \\ C \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} & I \cdot \Delta t & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

У момент приймання від ГНСС інформації про оцінку швидкості та координати об'єкта має місце такий процес вимірювань:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \xi_k; \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{z}_k = [v_{GPS} \quad r_{GPS}]^T$  – вектор поточного вимірювання від ГНСС,  $\mathbf{H}$  – матриця вимірювань,  $\mathbf{x}_k$  – вектор стану,  $\xi_k$  – вектор похибок вимірювань;  $0, I$  – нульова та одинична матриці розмірністю  $3 \times 3$ . Власне задача корекції БІНС має такий вигляд [13]:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}_k), \quad \bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \Phi_k \hat{\mathbf{x}}_k, \quad (4)$$

Рівняння фільтра Калмана, що генерують вектор оптимальної оцінки  $\hat{\mathbf{x}}_k$ :

$$\mathbf{K}_k = P_k(-) \mathbf{H}^T (\mathbf{H} P_k(-) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1}; \quad (5)$$

$$P_{k+1}(-) = \Phi_k P_k(+)\Phi_k' + \mathbf{Q}_k^T; \quad (6)$$

$$P_k(+)= P_k(-) - \mathbf{K}_k (\mathbf{H} P_k(-) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k) \mathbf{K}_k^T. \quad (7)$$

Тут матриці  $\mathbf{Q}_k, \mathbf{R}_k$  є коваріаційними матрицями похибок  $\mathbf{n}_k$  у рівняннях зміни похибок БІНС (2) та  $\xi_k$  у рівнянні вимірювань (3) відповідно.

Основною проблемою використання калманівської фільтрації в інтегрованій навігаційній системі є забезпечення збіжності обчислень. Суттєвою особливістю є те, що коваріаційна матриця змінних стану  $P$  є погано обумовленою, а матриці  $\Phi$  і  $\mathbf{H}$  в описаних вище рівняннях фільтрації утворюють не повністю спостережувану пару [12]. Ці обставини потребують підвищення точності обчислювальних процедур для забезпечення збіжності обчислювань калманівської фільтрації. Тому в інтегрованій навігаційній системі

використано алгоритм отримання множників Холецкого відповідних коваріаційних матриць [12, 13].

**Обертання матриць в інтегрованій навігаційній системі.** Оскільки в результаті факторизації отримуються трикутні матриці, то і всі обрахунки потім виконуються з ними. Процедура обертання матриці є процедурою, що потребує значних обчислень і яку не завжди можна уникнути в алгоритмах фільтрації. Проте кількість цих обчислень можна скоротити, якщо мова йде про трикутні матриці, оскільки обернена до трикутної матриця є теж трикутною. В даній роботі пропонується використати алгоритм обертання верхньої одиничної трикутної матриці [3], блок-схема якого представлена на рис. 2. У даному алгоритмі верхня одинична трикутна матриця перезаписується оберненою до неї. Кількість необхідних операцій для обертання матриці визначається у [3] як  $m \cdot (m-1) \cdot (m-2) / 6$ .

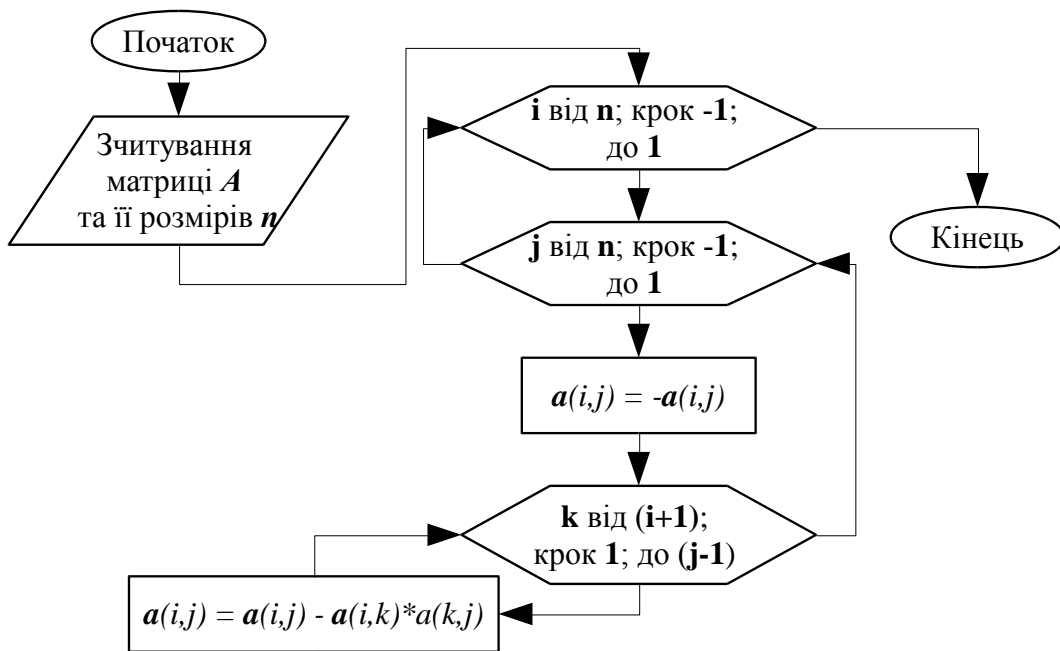


Рис. 2 – Блок-схема алгоритму обертання верхньої одиничної трикутної матриці

Для оцінки швидкодії та точності досліджуваних методів (Гауса, Жордана-Гауса та запропонованого) знаходження оберненої матриці було написано відповідні функції у програмному середовищі Code Warrior для мікропроцесора Freescale Kinetis K-60 [14] і апробовано на тестовій трикутній матриці розміром 9x9, яка є типовою в обчисленнях інтегрованої навігаційної системи.

Для оцінки швидкодії функцій було використано таймер із запрограмованим періодичним інтервалом уривання (англ. Periodic Interrupt Timer, PIT) [14]. Отримано такі результати: метод Гауса – 475 відліків, Жордана-Гауса – 305, запропонований метод – 90.

Оскільки будь-які чисельні методи знаходження оберненої матриці мають певні похибки через заокруглення та інші ефекти, то у результаті множення оберненої матриці на вихідну вийде матриця, наближена до одиничної. Для оцінки точності застосованих алгоритмів обертання матриці розраховуємо норму матриці похибок  $Q$ , яка в ідеалі має дорівнювати нулю:

$$err\_norm = \|Q\|_{(2)} = \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |q_{i,j}|^2 \right\}^{1/2}; \quad (8)$$

$$Q = E - \hat{E}; \quad \hat{E} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A}. \quad (9)$$

Отримано такі значення норми матриць похибок: метод Гауса –  $6.0913e-08$ , Жордана-Гауса –  $8.4336e-08$ , запропонований метод –  $6.0106e-08$ .

**Висновки.** В роботі проведено аналіз деяких відомих методів знаходження обернених матриць. Методи Гауса, Жордана-Гауса та запропонований метод обертання трикутної матриці було реалізовано у вигляді функцій у програмному середовищі Code Warrior для мікропроцесора Freescale Kinetis K-60 і апробовано на тестовій трикутній матриці. У результаті було визначено, що порядок точності зберігається приблизно таким же для всіх методів, а за швидкістю запропонований метод дає вигоду приблизно у 70 – 80 % у порівнянні з класичними методами Гауса та Жордана-Гауса відповідно. Подальші дослідження будуть спрямовані на методи факторизацій матриць та швидкодію інтегрованих навігаційних систем у цілому.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Конин В. В. Системы спутниковой радионавигации / В. В. Конин, В. П. Харченко; Национальный авиационный университет. – К. : Холтех, 2010. – 520 с.
2. Hofmann-Wellenhof B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and more // В. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle – Springer-Verlag Wien, 2008. – 516 p.
3. Grewall M. S. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration / M. S. Grewall, L. P. Weill, A. P. Andrews. – A John Wiley & Sons, Inc. Publ., New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto. – 2001. – 392 p.
4. George M. Siouris. Aerospace Avionics Systems: a modern synthesis. – Academic Press, Inc., 2007. – 466 p.
5. Kharchenko V. Multipurpose Remotely Piloted Aircraft System Integrated Navigation System Development and Testing / V. Kharchenko, S. Ilnytska // Logistic and Transport Journal. – V. 19, № 3, 3013. – pp. 85-90.
6. Coopmans C. AGGIEAIR: An Integrated and Effective Small Multi-UAV Command, Control and Data Collection Architecture / C. Coopmans, Y. Han // Proceedings of the ASME IDETC/CIE, 2009. – pp. 1-7.
7. Krishnamoorthy A. Matrix Inversion Using Cholesky Decomposition / A. Krishnamoorthy, D. Menon // Proceedings of the IEEE Conference «Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)», 26-28 Sept. 2013. – pp. 70-72.
8. Soleymani F. A Rapid Numerical Algorithm to Compute Matrix Inversion / Soleymani F. // International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences, vol. 2012, Article ID 134653, 2012. – 11 pages. – doi:10.1155/2012/134653
9. Bertsekas D. P., Tsitsiklis J. N. Parallel and Distributed Computation: Numerical Methods. – Athena Scientific, 1997. – 718 p.
10. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения / Г. Стренг. – М. : Мир, 1980. – 460 с.
11. Белоусов И. В. Матрицы и определители: учебное пособие по линейной алгебре / И. В. Белоусов. – Кишинев, 2006. – 101 с.
12. Larin V. B. Attitude-Determination Problems for a Rigid Body // Int. Appl. Mech. – 2001. – 37. – №7. – pp. 870-898.
13. Ларин В. Б. О корректировании работы системы инерциальной навигации / В. Б. Ларин, А. А. Туник // Проблемы управления и информатики. – 2010. – № 4. – С. 130-142.
14. Freescale Kinetis K60 Sub-Family Reference Manual, Rev. 2, Dec 2011. – 2075 p.

**Ильницкая С.И. ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РАСЧЕТОВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЗА СЧЕТ ЭКОНОМНОГО МЕТОДА ОБРАЩЕНИЯ МАТРИЦ**

*Несмотря на большое количество публикаций, посвященным интегрированным навигационным системам и методам вращения матриц, мало внимания уделяется техническим аспектам вопроса быстродействия таких систем. Основной целью данной работы является исследование возможностей повышения быстродействия вычислений в интегрированной навигационной системе путем использования улучшенной процедуры вращения треугольных матриц. В результате практической реализации методов Гаусса, Жордана-Гаусса и предложенного метода вращения треугольной матрицы в виде функций в программной среде Code Warrior на микропроцессоре серии Freescale Kinetis K-60 было определено, что порядок точности сохраняется примерно таким же для всех методов, а по быстродействию предложенный метод дает выигрыш примерно в 70–80% по сравнению с классическими методами Гаусса и Жордана-Гаусса соответственно. Данные результаты могут также быть использованы при программировании алгоритмов интегрированных навигационных систем в конкретном аппаратном обеспечении. В частности, в нашем случае было решено остановиться именно на предложенном методе вращения треугольных матриц.*

**Ключевые слова:** интегрированные навигационные системы, метод вращения треугольных матриц.

**Ilitska S.I. THE WAY TO INCREASE THE PERFORMANCE OF INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM DUE TO ECONOMIC METHOD OF FINDING THE MATRIX INVERSE**

*Despite the large number of publications devoted to integrated navigation systems and methods of finding the matrix inverse, little attention is paid to the technical aspects of the issue of such systems performance. The main goal of this work is to study the possibilities of improving the performance of calculations in an integrated navigation system using improved procedures for finding the inverse of triangular matrices. As a result of the practical realization of Gauss, Gauss-Jordan method and the proposed method of finding the inverse of triangular matrices as functions programmed in Code Warrior on a microprocessor from Freescale Kinetis K-60 series, it has been determined that the order of accuracy is approximately the same for all methods, but the performance of the proposed method gives the gain at about 70 -80% compared with the classical methods of Gauss and Gauss-Jordan respectively. These results can also be used for programming algorithms of integrated navigation systems in a concrete hardware. In particular, in our case it has been decided to choose the proposed method of finding the inverse of triangular matrices.*

**Keywords:** integrated navigation system, a method of rotating triangular matrices.

© Ильницкая С.И.

Статтю прийнято  
до редакції 1.10.14

## ВИКОРИСТАННЯ КРИПТОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОННИХ ДОКУМЕНТІВ

*Коленко В.В.*

*Одеський національний політехнічний університет*

*В статті визначено проблеми достовірності інформації в електронному документообігу та розглянуто підхід до розробки криптографічного алгоритму на основі технології хешування. Наведено основні вимоги щодо властивостей криптографічного алгоритму. Представлено узагальнену схему роботи алгоритму хешування та запропоновано метод захисту електронних документів на основі хешування та використання MD5.*

*Ключові слова:* криптографія, хешування, захист інформації.

**Постановка проблеми в загальному вигляді і її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями.** Система документообігу сучасного підприємства або організації має електронний вигляд і містить сканкопії документів на паперових носіях та електронні документи, які надходять до організації або створюються в результаті функціонування. Оскільки захисту потребують всі види документів, то необхідно розглядати проблему цілісності інформації та основні види атак на системи документообігу і засобів протидії.

На сьогоднішній час можна виділити дві основні задачі захисту цілісності інформації та підтвердження авторства цифрових даних.

Перша відноситься до інформаційного обміну в умовах взаємної довіри сторін. У цьому випадку необхідно забезпечити механізм, який дозволяє отримувачу бути впевненим, що дані прийшли від відправника та не є достовірними. Друга – в отримувача не повинно бути можливості створення недостовірних даних від імені відправника. Така постанова задачі передбачає відсутність довіри між сторонами.

Підходи та методи рішення обох видів задач істотно розрізняються. Наслідком даної ситуації стає об'єктивна потреба в дослідженні, перегляді й переосмисленні існуючих підходів, методологій і технологій розробки, впровадження методів захисту інформації. Важливим завданням даної роботи стає вдосконалення методу рішення проблеми захисту авторських прав за допомогою електронного цифрового підпису.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій і виділення невирішених завдань проблеми.** Існуючі системи криптографічних стандартів передбачають алгоритми імітозахисту – захисту від нав'язування противником помилкових даних. Ця ж методика дозволяє підтвердити авторство інформації в умовах взаємної довіри між відправником та отримувачем, але не захищає її від підробки з боку отримувача. Саме тому її іноді називають «симетричним цифровим підписом». Тому для вирішення проблеми захисту інформації можна застосувати метод впровадження та перевірки електронного цифрового підпису (ЕЦП). В схемах ЕЦП замість документа розглядається його хеш-функція  $h(x)$ , основна властивість якої – практична неможливість створення двох різних документів з однаковим значенням. Перевірка оригінальності документа полягає у контролі співвідношення, який за допомогою спеціального програмного забезпечення підтверджує достовірність інформації документа, його реквізитів і факту підписання конкретною особою [1].

**Формулювання цілей статті.** Мета інформаційної безпеки – забезпечити цілість системи електронного документообігу, захистити і гарантувати точність та повноту інформації, мінімізувати можливі руйнування, якщо інформація буде модифікована або пошкоджена. Інформаційна безпека вимагає обліку всіх подій, в ході яких інформація створюється, модифікується, до неї забезпечується доступ або вона поширюється. Проблема збереження електронних документів від копіювання, модифікації і підробки вимагає для свого вирішення специфічних засобів і методів захисту [2].

**Виклад матеріалів дослідження.** Найбільш поширеними та ефективними є криптографічні методи захисту інформації. Процес криптографічного закриття даних може здійснюватися як програмно, так і апаратно. Апаратна реалізація відрізняється істотно більшою вартістю, проте її властивостями і перевагами є висока продуктивність, простота, захищеність, але програмна реалізація більш практична. Для сучасних криптографічних систем захисту інформації сформульовані наступні загальноприйняті вимоги:

- зашифроване повідомлення повинне піддаватися читанню лише за наявності ключа;
- число операцій, необхідних для визначення використаного ключа шифрування по фрагменту шифрованого повідомлення і відповідного йому відкритому тексту, має бути не менше загального числа можливих ключів;
- число операцій, необхідних для розшифровки інформації шляхом перебору ключів повинно мати строгу нижню оцінку і не виходити за межі можливостей сучасних комп'ютерів (з урахуванням можливості мережевих обчислень);
- знання алгоритму шифрування не повинне впливати на надійність захисту;
- незначна зміна ключа повинна приводити до істотної зміни вигляду зашифрованого повідомлення навіть при використанні одного і того ж ключа;
- структурні елементи алгоритму шифрування мають бути незмінними;
- додаткові біти, що вводяться в повідомлення у процесі шифрування, мають бути повністю і надійно приховані в шифрованому тексті;
- довжина шифрованого тексту має бути рівною довжині вихідного тексту;

У схемах симетричної криптографії, зокрема в алгоритмах шифрування і створення імітовставки, обидва учасники інформаційного обміну поділяють єдиний секретний ключ, який можна створювати як простий масив з випадкових або псевдовипадкових бітів. Асиметрія ролей відправника і отримувача в схемах ЕЦП вимагає наявності двох тісно пов'язаних ключів: секретного або ключа підпису і відкритого, або ключа перевірки підпису. Другий з них ключем не є, оскільки ключ за визначенням зобов'язаний бути секретним. Будь-яка схема ЕЦП повинна визначити три наступних алгоритми:

- алгоритм генерації ключової пари для підпису та її перевірки;
- алгоритм підпису;
- алгоритм перевірки підпису.

Останні досягнення теорії обчислювальної складності показали, що загальна проблема логарифмування в дискретних полях, що є базою ЕЦП, не може вважатися досить міцною. Наприклад, розміри блоків, що вважаються «безпечними», зростають порівняно швидкими темпами. В результаті це призвело до того, що стандарти ЕЦП переведені на еліптичні криві [3]. Схеми ЕЦП при цьому залишилися колишніми, але в якості чисел, якими вони оперують, тепер використовуються не елементи кінцевого поля, а еліптичні числа – рішення рівняння еліптичних кривих над зазначеними кінцевими полями. Роль операції піднесення числа в ступінь в кінцевому полі в оновлених стандартах виконує операція взяття кратної точки еліптичної кривої – «множення» точки на ціле число [4].

Належний вибір типу еліптичної кривої дозволяє багаторазово ускладнити завдання викриття схеми ЕЦП і зменшити робочий розмір блоків даних, що призводить до більшої стійкості. Блоки даних, які можуть бути підписані безпосередньо, обмежені за розміром: вони не можуть виходити за межі використовуваної при роботі алгоритмів розрядної сітки. У той же час може виникнути потреба розробки ЕЦП для документа довільного розміру. Щоб подолати це обмеження, в схемах ЕЦП прийнято підписувати не безпосередньо електронний документ, а результат його перетворення до блока даних фіксованого розміру, званого хешем (hash) повідомлення. Функція виду  $y=f(x)$  називається криптографічною хеш-функцією, якщо вона задовольняє наступним властивостям:

- на вхід хеш-функції може поступати послідовність даних довільної довжини, результат же (званий *хеш*, або *дайджест*) має фіксовану довжину;
  - значення  $y$  по наявному значенню  $x$  обчислюється протягом поліноміального часу, а значення  $x$  за наявним значенням  $y$  майже у всіх випадках обчислити неможливо;
  - розрахунково неможливо знайти два вхідні значення хеш-функції, що дають ідентичні хеші;
  - під час обчислення хеша використовується вся інформація вхідної послідовності;
  - опис функції є відкритим і загальнодоступним.
- Алгоритм хешування повинен мати такі властивості, як:
- постійність розміру – для вхідного масиву даних довільного розміру результатом має бути блок даних фіксованого розміру;
  - обчислювальна необоротність – для заданого хеша не повинно бути способу підбору масиву даних під нього більш ефективним способом, ніж перебір по можливим значенням масиву даних;
  - свобода від колізій – не повинно існувати обчислювально ефективного способу пошуку двох масивів даних з однаковим значенням хеша [4].

У ході дослідження для загального алгоритму шифрування, було обрано технологію MD5. Основний принцип розробленого алгоритму полягає в тому, що на вхід алгоритму надходить вхідний потік даних, хеш якого необхідно знайти. Довжина повідомлення може бути будь-якою (у тому числі нульовою). Запишемо довжину повідомлення в  $L$ . Це число ціле і невід’ємне. Кратність необов’язкова. Після надходження даних йде процес підготовки потоку до обчислень.

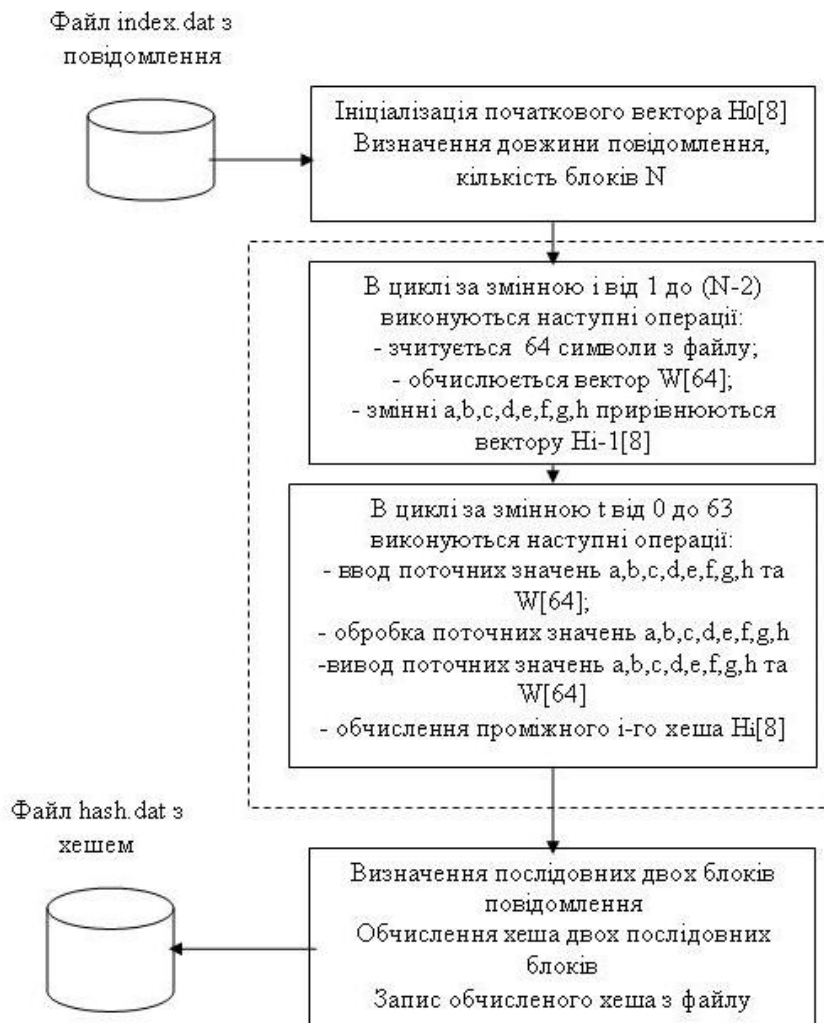


Рис. 1 – Узагальнена схема роботи алгоритму хешування

Основні етапи алгоритму хешування (рис. 1): ініціалізація початкового вектора; визначення довжини повідомлення; обчислення вектора; обчислення проміжного хешу; визначення послідовних блоків; обчислення послідовних блоків; запис обчисленого хешу з файлу.

У ході дослідження було розроблено метод захисту електронних документів на основі хешування та використання MD5 (рис. 2). Криптографічна хеш-функція використовується тут як засіб контрольного підсумовування: наприклад, для деякого файлу, розміщеного в публічний доступ на ftp-сервері, може бути подано його хеш, вирахований з використанням деякого алгоритму. У такому випадку користувач, що завантажив даний файл, може переконаватися в його автентичності. Проте зловмисник може підмінити файл і опублікувати хеш, що відповідатиме новому файлу – виявити подібні маніпуляції, використовуючи звичайні хеш-функції, неможливо. Захист від подібного роду атак забезпечується шляхом застосування кодів перевірки автентичності.

Кодами перевірки автентичності, або MAC-кодами, є криптографічні хеш-функції, для обчислення яких необхідно знати секретний ключ. Використання ключа дозволяє гарантувати неможливість підміни об'єктів, що захищаються, як було описано вище: зловмисник, що не знає секретного ключа, не зможе перерахувати хеш для нового файлу. У якості кодів перевірки автентичності часто використовуються модифікації симетричних криптографічних систем.



Рис. 2 – Метод захисту електронних документів

**Висновки та перспективи використання.** Захист інформації в системах електронного документообігу – нагальна потреба функціонування сучасного підприємства або організації. Вибір конкретних засобів захисту залежить від цінності інформації, яка оберігається. Тому при виборі методів та засобів захисту слід оцінити реальні втрати від розголошення або спотворення інформації.

В процесі роботи над загальним алгоритмом шифрування було виконано всі умови, які відносяться для такого ряду завдань. Але отриманий алгоритм має експериментальний характер, та з часом може пройти деякі етапи технічного удосконалення, оскільки використання MD5 має на увазі вирішення проблеми можливих колізій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Брюс Шнайдер. Прикладная криптография. [Текст] – М. : Диа Софт, 2000. – 368 с.
2. Коленко, В. В. Математические модели и методы процессов защиты информации [Текст] / В. В. Коленко, О. В. Нарожный, Г. Ф. Сафонова // Збірник наукових праць / Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві – Вип. 1 – Одеса, 2012 .
3. Ярочкин В. И. Информационная безопасность [Текст] / В. И. Ярочкин. – М. : Междунар. отношения, 2000. – 4000 с.
4. Домарев В. В. Безпека інформаційних технологій. Системний підхід [Текст] / В. В. Домарев. – К. : ТОВ «ГВД», 2004. – 992 с.

### **Коленко В.В., ПРИМЕНЕНИЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ**

*В статье определены проблемы достоверности информации в электронном документообороте и рассмотрен подход к разработке криптографического алгоритма на основе технологии хеширования. Приведены основные требования относительно свойств криптографического алгоритма. Представлены обобщенную схему работы алгоритма хеширования и предложен метод защиты электронных документов на основе хеширования и использования MD5.*

**Ключевые слова:** криптография, хеширования, защита информации

### **Kolenko V.V. APPLICATION IN THE CRYPTOGRAPHIC ALGORITHM WORK FOR DATE FILES**

*In the article the problems of information reliability in an electronic document and the approach to the design of cryptographic algorithm technology based hashing are defined. There are given major requirements for the properties of the cryptographic algorithm. The generalized scheme of the hashing algorithm and the method of electronic documents protection based on hashing and use of MD5 is presented.*

**Keywords:** cryptography, hashing, data protection.

© Коленко В.В.

Статтю прийнято  
до редакції 27.06.14

УДК 656.02

## МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНИХ ЗАМОВЛЕНЬ З ФУНКЦІЄЮ ТРАНСПОРТНИХ ВИТРАТ ДРІБНОПАРТІЙНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ДОВАНТАЖЕННЯМ

*Петровський А.В., Петровський В.П.*

*Херсонський національний технічний університет*

*На сьогоднішній час серед моделей визначення оптимальної кількості позицій асортименту в умовах формування багатоміністерських замовлень всі транспортні витрати визначають якою-небудь константою витрат на одне палетомісце кожного типу вантажу або без урахування типу вантажу. На основі аналізу конкретного ринку транспортних послуг можна побудувати аналітичну залежність транспортних витрат від кількості палетомісць для перевезень довантаженням з подальшим використанням у моделі формування замовлення. У статті вперше використано змінні транспортні витрати при моделюванні кількості позицій багатоміністерського замовлення зі знижками цін закупівлі при дрібнопартійних перевезеннях довантаженням. Недолік – необхідність нового моделювання функції транспортних витрат при зміні напрямку перевезень. Практичне використання розробленої моделі можливе у програмних пакетах ІС для невеликих підприємств з обсягами торгівлі, що дозволяють дрібну доставку товару. Розроблена модель дає альтернативу наявній кількості моделей з фіксованою ціною транспортних послуг.*

**Ключові слова:** багатоміністерський заказ, функція транспортних витрат, цільова функція, система обмежень.

**Вступ.** Конкуренсоздатність торговельних організацій в умовах зростання економіки України внаслідок складних політичних та економічних реалій прямо пропорційно залежить не тільки від активності відділів збуту, а й від можливостей зменшення відпускної ціни. Один з параметрів, на який торговельна організація має вплив, – це транспортні витрати. Моделювання складської діяльності неможливе без урахування транспортної складової, оскільки вартість доставки прямо переноситься на ціну приходування товару на склад. Тому використання моделей оптимізації цих витрат є одним з важелів зменшення собівартості товарів.

**Актуальність досліджень.** На сьогоднішній час серед моделей визначення оптимальної кількості позицій асортименту в умовах формування багатоміністерських замовлень всі транспортні витрати визначають якою-небудь константою витрат на одне палетомісце кожного типу вантажу або без урахування типу вантажу (лише як витрати на перевезення в середньому на одне палетомісце) [1–3]. При обмеженнях складської площі торговельного підприємства та наданні йому цінних знижок від постачальника за деякими позиціями асортименту, вибір кількості закупівель з урахуванням змінних транспортних витрат є дуже не однозначною задачею. Найбільш привабливішою моделлю на сьогоднішній день є модель залежності витрат доставки від обсягу замовлення [1], однак, транспортні витрати передбачаються як зворотно пропорційні кількості кожної позиції асортименту у багатоміністерському замовленні. Спрощення визначення транспортних витрат без урахування напрямків перевезень/типів вантажу при цьому приводить до неможливості заздалегідь точніше прорахувати транспортні витрати, а значить нівелює можливе зменшення відпускної ціни за рахунок зменшення вартості транспортних перевезень. Результат аналізу ринку транспортних послуг України [4, 5] показав, що на вартість транспортних послуг впливає не тільки відстань транспортування, вид вантажівки, її фізичні параметри [6], а й напруженість транспортних напрямків: чим більше наявна кількість заяв на перевезення від відповідних юридичних осіб, тим вартість перевезень нижче. Крім того, необхідно враховувати також моделі зменшення великої партії на сукупність менших, оскільки у деяких випадках це дозволяє знизити транспортні

витрати супроти загально визначеної думки зменшення витрат при збільшенні обсягів перевезень [7].

**Мета дослідження** – розробка моделі формування оптимальної кількості асортименту багатомономенклатурного замовлення з функцією транспортних витрат при дробленні великої партії на сукупність менших партій для перевезень довантаженням великовантажних автомобілів. Об'єктами дослідження у статті є: ринок транспортних послуг України та закупівельна діяльність торгівельних підприємств. Предметом дослідження є логістика закупівель торгівельних організацій. Методами дослідження є: аналіз всеукраїнської біржи транспортних послуг [4, 5], операційний аналіз закупівельної діяльності.

**Результати досліджень.** У витратах по складу враховують постійні та змінні витрати, останні можливо розрахувати як середні за місяць (електроенергія, опалення у зимовий період, якщо воно нерівномірно розподіляється на місяці року), паливо, мастила для складської техніки, витрати на її технічний огляд та ремонт, канцелярські витрати). До постійних складських витрат можна віднести: витрати на оренду приміщення складу, фонд заробітної плати працівників складу, амортизація основних засобів (ПЕОМ, складської техніки).

Витрати по складу на 1 палетомісце розраховують за формулою:

$$Z_{скл_n} = \frac{Z_{пост} + Z_{зм}}{30N_{заг}}, \quad (1)$$

де  $N_{заг}$  – загальна можлива кількість палетомісць на складі з урахуванням продовжних проходів та площ, зайнятих під прийомку, комплектацію та відвантаження, пал.

Альтернативний дохід оборотним коштом, вкладеними у закупівлю допоміжних обсягів палетованого вантажу складається із суми коштів, витрачених на закупівлю надзвичайних обсягів та витрат, у зв'язку зі збільшенням часу збереження (оскільки попит не збільшується, то витрати продукції по складу залишаються на попередньому рівні):

$$D_a = \sum_{i=1}^n \left( (\Delta B_{зак_i} + \Delta B_{зб_i}) \frac{R}{360} (t_{2_i} - t_{1_i}) \right), \quad (2)$$

де  $t_{2_i}, t_{1_i}$  – час збереження збільшеної партії вантажу  $i$ -ї позиції асортименту та обсягу партії звичайної закупівлі відповідно, діб;  $R$  – річна ставка альтернативного доходу (оскільки підприємство не займається пошуком допоміжних напрямів розвитку бізнесу, то цю ставку можна інтерпретувати як депозит для юридичних осіб у національній валюті для банківських установ), %;  $n$  – кількість позицій асортименту;  $\Delta B_{зак_i}$  – сума збільшення витрат на безпосередню закупівлю палетованого вантажу  $i$ -ї позиції асортименту, грн.;  $\Delta B_{зб_i}$  – сума збільшення вартості збереження  $i$ -ї позиції асортименту, оскільки кількість діб збереження збільшиться, грн.;  $D_a$  – альтернативний дохід, грн.

$$\Delta B_{зб_i} = Z_{скл_n} (m_{2_i} - m_{1_i}) (t_{2_i} - t_{1_i}); \quad (3)$$

$$\Delta B_{зак_i} = (C_{2_i} + C_{2mp_i}) m_{2_i} - m_{1_i} (C_{1_i} + C_{1mp_i}), \quad (4)$$

де  $m_{1_i}$  – звичайний обсяг партії закупівлі  $i$ -ї позиції асортименту, пал.;  $C_{1_i}$  – закупівельна ціна при звичайному обсязі закупівель за 1 палету, грн./пал.;  $C_{1mp_i}$  – ціна за транспортування  $i$ -ї позиції асортименту в перерахунку за 1 палету (у залежності від кількості палетомісць для транспортування), при звичайному обсязі закупівель, грн./пал.;

$C_{2mp_i}$  – ціна за транспортування  $i$ -ї позиції асортименту в перерахунку за 1 палету (у залежності від кількості палетомісць для транспортування), при надзвичайному обсязі закупівель, грн./пал.;  $C_{2_i}$  – закупівельна ціна зі знижкою 1 палети  $i$ -ї позиції асортименту, грн./пал. (при надзвичайному обсязі закупівель).

Якщо постачальник дає знижку ціни від збільшення обсягу закупівель, збільшення доходу при продажах всього закупленого збільшеного обсягу товарів можна представити формулою:

$$\Delta D = \sum_{i=1}^n m_{2_i} [(C_{1_i} + C_{1mp_i}) - (C_{2_i} + C_{2mp_i})]. \quad (5)$$

Збільшення обсягу закупівель при запропонованій ціні можливе, якщо виконується умова:

$$\Delta D - \Delta B_{зак} - D_a > 0, \quad (6)$$

де  $\Delta B_{зак}$  – сума збільшення витрат на безпосередню закупівлю всього палетованого вантажу, грн.

$$\Delta B_{зак} = \sum_{i=1}^n \Delta B_{зак_i}. \quad (7)$$

Тобто повинна бути можливість одержання якого-небудь доходу від збільшення витрат на закупівлю та зростання строків збереження товарів при незмінному попиті. Зрозуміло необхідність збільшення різниці.

Цільова функція:

$$f(m_{2_i}) = \Delta D - \Delta B_{зак} - D_a \rightarrow \max. \quad (8)$$

Обмеженнями можуть виступати, наприклад прогнозована кількість вільних палетомісць на складі на момент отримання збільшеної кількості палет:

$$\sum_{i=1}^n m_{2_i} = \underbrace{S_B}_{S_B \leq N}, \quad (9)$$

де  $S_B$  – кількість вільних палетомісць, пал.

Також наявність незначної кількості оборотних коштів свідчить про необхідність прийняти його як обмеження при здійсненні закупівель понад звичайного обсягу:

$$\Delta B_{зак} + \Delta B_{зб} \leq B_{обм} + B_{зв}, \quad (10)$$

де  $\Delta B_{зб}$  – різниця вартості збереження збільшеного обсягу закупівель та звичайного за всіма позиціям асортименту, грн.;  $B_{обм}$  – наявні оборотні кошти, які можливо витратити на збільшення закупівель, грн.;  $B_{зв}$  – оборотні кошти, які звичайно витрачаються на здійснення закупівель, грн.

$$\Delta B_{зб} = \sum_{i=1}^n \Delta B_{зб_i}. \quad (11)$$

Таким чином, математична модель нелінійного програмування (відносно  $m_{2_i}$ ) є наступною:

$$f(m_{2_i}) = \sum_{i=1}^n (\Delta D_i - \Delta B_{зак_i} - D_{a_i}) \rightarrow \max; \quad (12)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n m_{2i} = S_B \\ S_B \leq N \\ \sum_{i=1}^n (\Delta B_{\text{зак}i} + \Delta B_{\text{зб}i}) \leq B_{\text{обм}} + B_{\text{зв}} \\ m_{2i} \geq m_{1i} \end{cases} \quad (13)$$

При цьому збільшення строків зберігання прямо пропорційно збільшенню обсягів закупівель, оскільки попит не змінився:

$$\frac{m_{2i}}{m_{1i}} = \frac{t_{2i}}{t_{1i}}$$

Звідки

$$t_{2i} = t_{1i} \frac{m_{2i}}{m_{1i}} \quad (14)$$

З урахуванням всього вищепереліченого розгорнута цільова функція:

$$\begin{aligned} f(m_{2i}) = \sum_{i=1}^n & \left( m_{2i} (C_{1i} + C_{1mp_i} - C_{2i} - C_{2mp_i}) \right. \\ & - \frac{R}{360} t_{1i} \left( \frac{m_{2i}}{m_{1i}} - 1 \right) \left( m_{2i} (C_{2i} + C_{2mp_i}) - m_{1i} (C_{1i} + C_{1mp_i}) \right. \\ & \left. \left. + 3_{\text{склп}} (m_{2i} - m_{1i}) t_{1i} \left( \frac{m_{2i}}{m_{1i}} - 1 \right) \right) \right) \\ & - 3_{\text{склп}} (m_{2i} - m_{1i}) t_{1i} \left( \frac{m_{2i}}{m_{1i}} - 1 \right) \Big) \rightarrow \max \end{aligned} \quad (15)$$

Функції транспортних витрат ( $C_{1mp_i}$  та  $C_{2mp_i}$ ) в кожному окремому напрямку необхідно будувати наново, оскільки на вартість перевезення впливає напруженість транспортних напрямків, що призводить до зміни аналітичної залежності функції транспортних витрат. В результаті досліджень виявлено також залежність вартості автоперевезень і від дня тижня. Тобто параметрів, які мають вплив на вартість перевезень багато, і для аналітичних розрахунків було проведено опитування перевізників та визначено середні вартості за перевезення палетованих вантажів приблизно однієї ваги (приблизно 0,4 т/палета).

Побудовано залежність вартості перевезень від кількості палет за принципом оптимальної доставки з мінімальною вартістю (рис. 1).

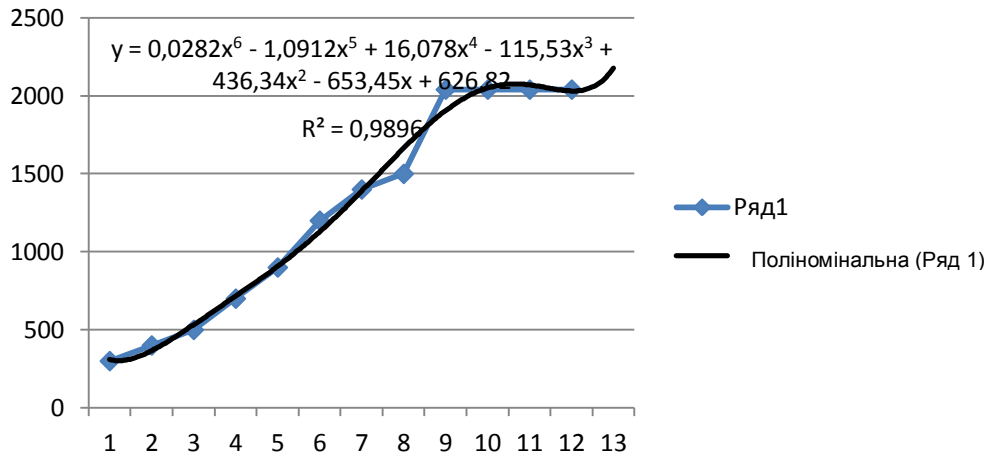


Рис. 1 – Графік залежності транспортних витрат від кількості палетомісць

Отриманий за допомогою програмного пакету MS Excel аналітичний вираз залежності вартості перевезень від кількості палет приналежить напрямку Київ-Одеса:

$$C_{2mp_i} = 0,0282m_{2_i}^6 - 1,0912m_{2_i}^5 + 16,078m_{2_i}^4 - 115,53m_{2_i}^3 + 436,34m_{2_i}^2 - 653,45m_{2_i} + 626,82, \quad (16)$$

де  $i$  – позиція асортименту у багатонаменклатурному замовленні;  $m_{2_i}$  – змінна кількість збільшеного обсягу палетованого вантажу для збереження на складі, пал.;  $C_{2mp_i}$  – ціна за транспортування  $i$ -ї позиції асортименту в перерахунку за 1 палету (у залежності від кількості палетомісць для транспортування) при збільшеному обсязі закупівель, грн./пал.

Відрізняється від ціни транспортування за звичайний обсяг вантажу тим, що при останньому можна визначити транспортні витрати на 1 палету, оскільки відома кількість вантажу, тоді як при збільшенні обсягів, кількість вантажу невідома (це є пошукований параметр), тому визначити оптимальну суму доставки не має можливості. При цьому треба по витратах на транспортування при звичайному обсязі встановити аналітичну залежність цих витрат від кількості палетомісць для транспортування, яку потім можна використати при моделюванні витрат на транспортування збільшеного обсягу перевезень.

Для спрощення в розрахунках прийнято допущення, що функція-модель транспортних витрат є лінійною з достатньо великим ступенем адекватності, що видно на графіку (рис. 2):

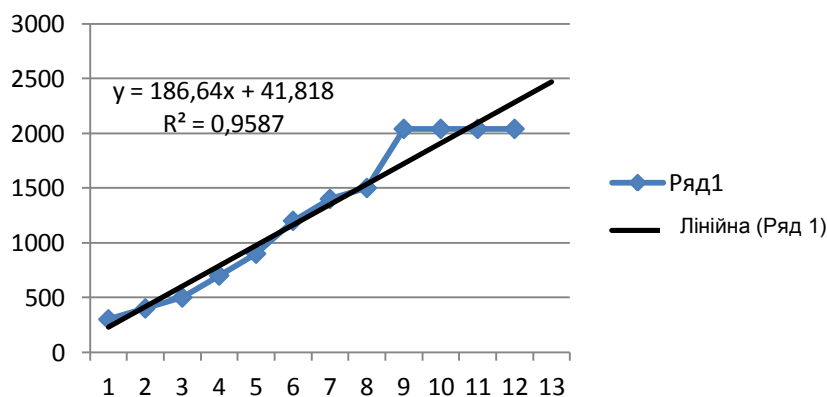


Рис. 2 – Графік лінійної залежності транспортних витрат на весь обсяг закупівель

Вказані графіки коректно відображають транспортні витрати лише до 12 палетомісць, оскільки при збільшенні кількості палетомісць витрати будуть дорівнювати вартості фрахту всієї вантажівки, тобто ціна на такі великі партії не буде залежати в подальшому від кількості палетомісць. Наприклад, вартість фрахту вантажівки з можливістю перевезень до 22 палет за 16 палет буде практично така, як за повне завантаження.

Використовувана модель у подальшому при визначенні транспортних витрат є наступна:

$$C_{2mp_i} = 186,64m_{2_i} + 41,818. \quad (17)$$

Для спрощення подальшого використання треба ввести наступні позначення:

$$\begin{aligned} a_i &= C_{1_i} + C_{1mp_i} \\ b_i &= C_{2_i} + C_{2mp_i} \\ c_i &= \frac{R}{360} t_{1_i} \\ d_i &= 3_{скл_n} t_{1_i} \end{aligned} \quad (18)$$

Тоді:

$$f(m_{2_i}) = \sum_{i=1}^n \left( m_{2_i}^3 \left( \frac{c_i d_i}{m_{1_i}^2} \right) + m_{2_i}^2 \left( \frac{3c_i d_i - c_i b_i - d_i}{m_{1_i}} \right) + m_{2_i} (a_i - b_i + c_i b_i + c_i a_i - 3c_i d_i + 2d_i + c_i d_i m_{1_i} - c_i a_i m_{1_i} - d_i m_{1_i}) \right) \rightarrow \max.$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n m_{2_i} = S_B \\ S_B \leq N \\ \sum_{i=1}^n \left( m_{2_i}^2 \left( \frac{d_i}{m_{1_i}} \right) + m_{2_i} (b_i - 2d_i) + d_i m_{1_i} - a_i m_{1_i} \right) \leq B_{обм} + B_{зв} \\ m_{2_i} \geq m_{1_i} \end{cases} \quad (19)$$

Спрощення за допомогою введення коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} z_{1_i} &= -\frac{c_i}{m_{1_i}} \left( \frac{d_i}{m_{1_i}} + 186,64 \right); \\ z_{2_i} &= \frac{3c_i d_i - c_i (b_i + 41,818) - d_i}{m_{1_i}} + 186,64(c_i - 1); \\ z_{3_i} &= (b_i + 41,818)(c_i - 1) + a_i(1 + c_i) - d_i(3c_i - 2); \\ z_{4_i} &= m_{1_i}(c_i d_i - c_i a_i - d_i); \\ z_{5_i} &= \frac{d_i}{m_{1_i}} + 186,64; \end{aligned} \quad (20)$$

$$z_{6i} = b_i + 41,818 - 2d_i;$$

$$z_{7i} = m_{1i}(d_i - a_i).$$

Тоді кінцевий вигляд математичної моделі:

$$f(m_{2i}) = \sum_{i=1}^n (z_{1i}m_{2i}^3 + z_{2i}m_{2i}^2 + z_{3i}m_{2i} + z_{4i}) \rightarrow \max \quad (21)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n m_{2i} = S_B \\ S_B \leq N \\ \sum_{i=1}^n (z_{5i}m_{2i}^2 + z_{6i}m_{2i} + z_{7i}) \leq B_{обм} + B_{зв} \\ m_{2i} \geq m_{1i} \end{cases} \quad (22)$$

Цільова функція (21) та обмеження (22) з урахуванням скорочень (18-20) носять нелінійний характер, тому подальше рішення бажано проводити з використанням методу множників Лагранжа.

**Висновки.** Математичне моделювання обсягів закупівель може принести значну вигоду, якщо враховувати наступні параметри: напрямок перевезень та можливість довантаження вантажівки, основний фрахт якої вже сплачено іншими покупцями (на прикладі контейнеровозів); яка ситуація на ринку транспортних послуг (наприклад, якщо не має контейнеровозів, то функція транспортних витрат буде значно змінена, тоді і цільова функція та обмеження змінять свій вигляд) та ін.. Розроблена модель дає альтернативу наявній кількості моделей з фіксованою ціною транспортних послуг. Практичне використання розробленої моделі можливе у програмних пакетах ІС для невеликих підприємств, у яких обсяги торгівлі дозволяють дрібну доставку товару.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бродецкий Г. Л. Управление запасами / Г. Л. Бродецкий. – М. : «Эксмо», 2008 – 275 с.
2. Таха О. Введение в исследование операций. – М. : Вильямс, 2001. – 912 с.
3. Разгуляев В. Автоматизация многономенклатурных закупок без фиксирования периода между поставками [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://upravlenie-zapasami.ru/statii/avtomatizaciya-mnogonomenklaturnih-zakupok/>
4. Сайт всеукраїнської біржі автотранспортних послуг [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://della.ua>
5. Сайт всеукраїнської біржі автотранспортних послуг [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lardi-trans.com.ua>
6. Кокин А. С. Транспортно-экспедиторские услуги при перевозке грузов / А. С. Кокин – М. : Инфотропик Медиа, 2011 – 576 с.
7. Петровський А. В. Модель вибору типу автовантажівки за критерієм ціни трансферу в умовах дрібнопартійного постачання великої партії / А. В. Петровський, В. П. Петровський // Науковий вісник ХДМА. – 2013. – № 2 (9). – С. 270

**Петровский А.В., Петровский В.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ ЗАКАЗОВ С ФУНКЦИЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАТРАТ МЕЛКОПАРТИОННЫХ ПЕРЕВОЗОК ДОГРУЗОМ**

*На данный момент среди моделей определения оптимального количества позиций ассортимента в условиях формирования многономенклатурных заказов все транспортные затраты определяют константой затрат на одно паллетоместо каждого типа груза/без учета типа груза. На основе анализа конкретного рынка транспортных услуг можно построить аналитическую зависимость транспортных затрат от количества паллетомест для перевозок догрузом с дальнейшим использованием в модели формирования заказа. В статье впервые использованы переменные транспортные затраты при моделировании количества позиций многономенклатурного заказа со скидками цен закупки при мелкопартионных перевозках догрузом. Недостатком является необходимость нового моделирования функции транспортных затрат при изменении направления перевозок. Практическое использование разработанной модели возможно в программных пакетах ИС для небольших предприятий с объемами торговли, позволяющими доставку товара частями. Разработанная модель дает альтернативу имеющемуся количеству моделей с фиксированной ценой транспортных услуг.*

**Ключевые слова:** многономенклатурный заказ, функция транспортных затрат, целевая функция, система ограничений.

**Petrovsky A.V. Petrovsky V.P. DESIGN OF MULTITOP-LEVEL ORDERING WITH TRANSPORT EXPENSES FUNCTION OF SHALLOW PARTS TRANSPORTATIONS BY FINISHING LOADING**

*Now among the models of determining the optimum amount of assortment positions in the conditions of multitop-level orders forming all transport expenses determine the constant of expenses on one pallet place of every load type/without account of load type. On the basis of concrete market of transport services analysis it is possible to build analytical dependence of transport expenses on the amount of pallet places for transportations of finishing loading with the further use in the model of order forming. In the article variable transport expenses are first used at the design of positions amount of the multitop-level ordering from the discounts of costs of purchase at shallow parts transportations of finishing loading. Failing is a necessity of new design of transport expenses function at the change of transportations direction. The practical use of the developed model is possible in the programmatic packages of IC for small enterprises with the volumes of trade, allowing delivery of parts commodity. The developed model gives an alternative the present amount of models with the fixed cost of transport services.*

**Keywords:** multitop-level order, transport expenses function, objective function, system of limitations.

© Петровський А.В., Петровський В.П.

Статтю прийнято  
до редакції 3.10.14

УДК 656.02

## КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГНОЗОВАНОЇ КІЛЬКОСТІ ЗАПЧАСТИН З УРАХУВАННЯМ МАЛИХ ВИБІРОК СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ

*Петровський А.В., Петровський В.П.*

*Херсонський національний технічний університет*

*Планування роботи АТП на відповідний період значним чином впливає на прогнозування конкретних видів витрат, у тому числі на витрати пов'язані із придбанням та встановленням запчастин. Додатковим фактором, ускладнюючим прогнозування оцінки технічного стану транспортних засобів, є накопичування великої кількості статистичних даних, виборки яких для подальшого моделювання малими АТП є непрезентативними. Аналіз існуючих концепцій моделювання кількості запасних частин призводить до необхідності розробки більш спрощеної моделі. У статті пропонується використання бази знань для формування та використання аналітичних залежностей у вигляді провідних функцій відказів. Розроблений алгоритм аналізу параметрів рухомого складу з використанням бази знань, дозволяє скоротити час моделювання для визначення кількості запчастин на планований період. Запропонована концептуальна модель відрізняється від існуючих удосконаленим алгоритмом з наявністю бази знань. Найбільш привабливим сегментом ринку для практичного використання моделі є невеликі АТП.*

***Ключові слова:** АТП, прогнозування кількості запчастин, база знань, алгоритм аналізу параметрів рухливого складу, концептуальна модель.*

**Вступ.** Сучасне АТП для підвищення конкурентоздатності на ринку автотранспортних послуг повинно контролювати всі матеріальні потоки, пов'язані із його господарчою діяльністю для визначення вузьких місць, де можливе зниження витрат, що дозволить знизити ціни на транспортування. Значною мірою контроль залежить і від очікуваних витрат, які можуть бути спрогнозовані на основі аналітичної інформації з первісних документів: договорів на обслуговування парку транспортних засобів (ТЗ), на перевезення, актів технічного огляду поточного стану ТЗ та ін.

**Актуальність досліджень.** Такі витрати, як витрати на придбання та встановлення запчастин, дуже важко піддаються аналізу, оскільки знос тієї чи іншої запчастини залежить від великої кількості параметрів: кількості вантажу, перевезеного за одну поїздки (наслідком перевантаження є, наприклад, підвищений знос двигуна та рухомої складової, шин), покриття дороги, майстерності водія, кількості рейсів та багатьох інших. Більшість з них накопичуються і впливають на роботу автопарку не одразу на наступний рейс, а згодом [1]. Тому прогнозування таких витрат є однією з актуальніших проблем автотранспортних підприємств. Точність прогнозування всієї роботи АТП на планований період значним чином впливає на прогнозування конкретних видів витрат, у тому числі на витрати, пов'язані із придбанням та встановленням запчастин.

Потреба АТП у запасних частинах визначається, в основному, надійністю автомобілів (агрегатів, деталей), інтенсивністю експлуатації і віковою структурою рухливого складу. Надійність автомобілів (агрегатів, деталей) оцінюється за провідною функцією потоку відмовлень, що визначається ресурсами деталей до відмови [2]. У роботі [3, 4] розглянуто підхід, що дозволяє об'єднати методи оцінки надійності автомобіля і методи прогнозування потреби в запасних частинах, агрегатах шляхом створення і використання єдиної інформаційної бази, при цьому провідна функція потоку відмовлень і пробіг з початку експлуатації, зв'язуються не тільки функціонально, але і мають єдину інформаційну основу, визначаються надійністю деталей автомобіля. Тому вказані показники на рівні середніх і великих транспортних підприємств визначаються з використанням єдиної інформаційної бази даних (ЄІБД), що включає дані про надійність деталей, вузлів і агрегатів автомобіля.

Перебування провідної функції потоку відмовлень деталей і річного пробігу автомобіля в єдиній інформаційній базі можливо, якщо останній показник обчислювати на основі моделювання імовірності безвідмовної роботи (коефіцієнта випуску) рухливого

складу з урахуванням надійності агрегатів, вузлів, деталей автомобіля. При цьому прогноз потреби в запасних частинах ґрунтується на обчисленні характеристик процесу відновлення деталей, агрегатів і автомобіля, моделюванні коефіцієнта випуску і прогнозуванні пробігу на плановий період по вікових групах автомобілів. Аналогічно визначається потреба в автомобільних агрегатах. Механізм моделювання повинен самостійно брати за основу накопичувальні статистичні дані великої кількості параметрів, які тим чи іншим чином мають вплив на знос прогнозованих типів запчастин.

Дані обстежень АТП показують, що тут може бути досить велика різноманітність у розподілах навіть початкових пробігів, але при цьому можна виділити два особливих випадки: перший, коли спостерігається однакове число автомобілів всіх вікових категорій (рівномірний розподіл); і другий, коли вся група автомобілів одного року випуску. Але це лише один з багатьох прикладів складності подальшого використання статистичних даних. Ще одним прикладом складності використання такої моделі є доступ та поповнення ЄІБД різними АТП.

Тобто на цей час є необхідністю така концепція моделювання, яка значною мірою адекватності та спрощення відображає дійсний стан рухомого стану автопарку конкретного підприємства та його потреби на певний період на прикладі визначення кількості запчастин.

**Метою дослідження** є створення моделі та алгоритму визначення прогнозної кількості запчастин з урахуванням малих вибірок статистичних даних, що є особливістю для малих підприємств з невеликим автопарком. Об'єктом дослідження у статті є рухомий склад АТП. Предметом дослідження є логістичні процеси закупівлі запчастин. Методами дослідження є ймовірнісні методи та методи інформаційних технологій.

**Результати досліджень.** Пропонується використання бази знань, до якої заносяться аналітичні залежності провіної функції відказів для всіх запчастин, по яких є накопичувана інформація у ЄІБД. З урахуванням складності прогнозування доцільно використовувати загальний алгоритм обробки накопичуваних даних. Одним з прикладів використання методів імовірнісного підходу, коли кількість та асортимент деталей на заміну планується залежно від поточного стану транспортних засобів та прогнозованого пробігу на поточний рік індивідуально до кожного транспортного засобу і є даний алгоритм:

1. Насамперед згрупувати транспортні засоби з однаковими каталожними номерами запчастин та які мають невеликий строк експлуатації.
2. Класифіковані групи розглядають окремо. По кожній групі формують перелік запчастин з ресурсом пробігу за технічними характеристиками виробників.
3. За методами прогнозування, на базі даних попередніх періодів та наявних договорів поточного року моделюють рівняння прогнозу пробігів кожного транспортного засобу та визначають пробіг на кінець поточного року.
4. За допомогою математичного апарата теорії ймовірностей створюють математичну модель імовірних поломок з урахуванням: пробігу на початок поточного року, останній ремонт кожного з обраних для обстеження вузлів та агрегатів, пробіг на кінець поточного року.
5. Аналізують економічну ефективність від заздалегідь придбаних запчастин, підлеглих заміні протягом поточного року.

Блок-схема визначення необхідної кількості запчастин представлена на рис. 1.

Після аналізу договорів на трансфер вантажів та визначення прогнозованого пробігу, картина по пробігах, можливо, виявиться неоднозначною: чи рівномірний розподіл, чи пробіги зосереджені в досить вузькому інтервалі. У всіх інших випадках початкові пробіги повинні бути змодельовані з урахуванням залежності середніх річних пробігів від терміну служби:

$$L_r = f(T_c), \quad (1)$$

де  $f(T_c)$  – функція залежності середніх річних пробігів від терміну служби; пробігів, накопичених з початку експлуатації  $L_H$ , а також відповідних залежностей для середніх квадратичних відхилень  $\delta_r = f(T_c)$ ,  $\delta_H = f(T_c')$  і заданих (обраних) законів розподілу. Для формування бази вихідних даних (блок 1) використовуються фактичні дані АТП, нормативні дані, скоректовані з урахуванням умов експлуатації автомобілів.

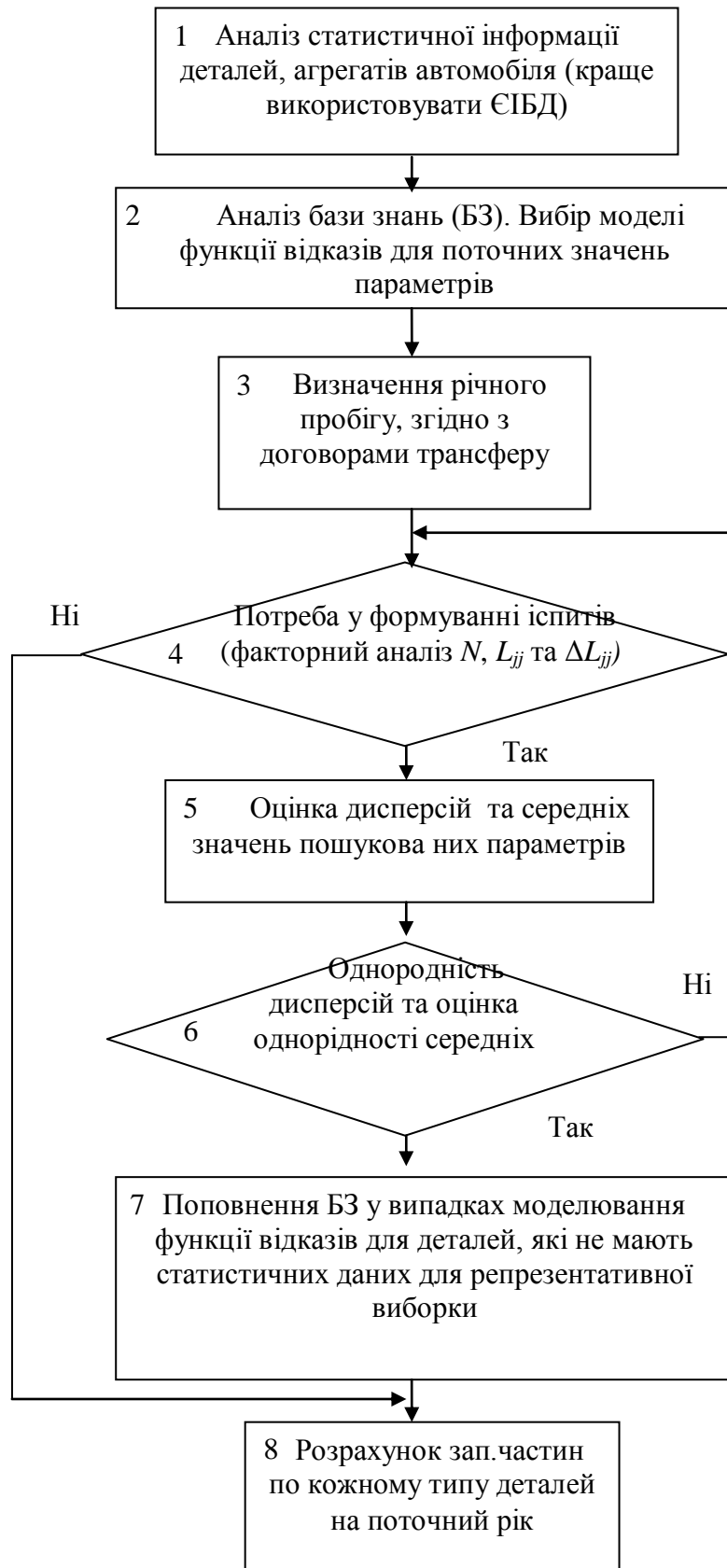


Рис. 1 – Блок-схема визначення необхідної кількості запчастин

У блоці 2 здійснюється вибір з бази знань за значеннями параметрів функції відмовлень деталей даного типу.

У блоці 3 моделюються річні пробіги  $\Delta L_{ij}$  –  $i$ -го автомобіля для  $j$ -го року експлуатації.

У блоці 4, якщо статистичних даних замало для достовірного аналізу відмовлень, моделюються серії вхідних даних для подальшого аналізу (методика аналізу використовуються як при багатофакторному аналізі).

Блоки 5 та 6 є оцінювальними для згенерованої серії іспитів. Для малих вибірок (малих підприємств) важливе проведення оцінки стабільності результатів моделювання з використанням статистичних методів. У випадку позитивного результату на моделювання серії іспитів або малої виборки у блоці 7 виконується моделювання функції потоку відмовлень деталі даного типу. Вихідними даними для моделювання потоку є середні значення і середньоквадратичні відхилення ресурсів деталей до першого і наступного відмовлень, середні значення і середньоквадратичні відхилення ресурсів до капітального ремонту агрегату, автомобіля й інші дані. Побудована функція відмовлень поповнює базу знань.

У блоці 8 проводиться розрахунок необхідної кількості запасних частин на основі змодельованих потоків відмовлень для  $N$  автомобілів, при цьому для кожного  $i$ -го автомобіля відомий початковий пробіг на початок планованого року  $L_{ij}$  і відповідно планований чи прогнозований річний пробіг  $\Delta L_{ij}$ . Підсумовування числа відмовлень (замін) деталей  $n_i$  по всім  $N$  автомобілям дозволяє визначити необхідну кількість запасних частин.

**Висновки.** У статті показано актуальність змін у політиці управління запасними; розроблено концепцію визначення кількості запчастин на планований період з урахуванням імовірнісного підходу та методів інформаційних технологій; розроблено алгоритм автоматизації процесу прогнозування кількості запчастин. Розроблена концепція може мати практичну цінність для невеликих АТП, які не мають можливості формувати репрезентативну ЄБД завдяки невеликій кількості транспортних засобів. Використання загальної ЄБД, сформованої іншими АТП, може бути значним покращенням моделі, однак, для цього необхідно узагальнити параметри дорожньої мережі: ввести класифікацію остаточного покриття доріг (для ідентичності процесів зносу, наприклад, трансмісії автомобілів), якими-небудь коефіцієнтами враховувати майстерність водіїв та ін. Тобто практичне використання загальної ЄБД є дуже складним процесом, в той час використання розробленої моделі спрощує моделювання. Подальшим напрямком досліджень є побудова правил виводу на базі логіки предикатів для бази знань.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Максимов В. Г. Анализ состояний малых автотранспортных предприятий / В. Г. Максимов // Праці Одеського політехнічного університету. – 2011. – № 2 (36). – С. 88.
2. Лукинський В. С. Прогнозирование надежности автомобилей / В. С. Лукинський. – Л. : Политехника, 1991 – 224 с.
3. Кузьмин Н. А. Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации / Н. А. Кузьмин. – Н. Новгород : НГСХА, 2001 – 317 с.
4. Поляков А. В. Метод формирования необходимого количества запасных частей для ремонта средств транспорта // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 2 – С. 47.

**Петровский А.В., Петровский В.П. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗИРУЕМОГО КОЛИЧЕСТВА ЗАПЧАСТЕЙ С УЧЕТОМ НЕБОЛЬШИХ ВЫБОРОК СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

*Планирование работы АТП на соответствующий период значительным образом влияет на прогнозирование конкретных видов затрат, в том числе на затраты, связанные с приобретением и установкой запчастей. Дополнительным фактором, усложняющим прогнозирование оценки технического состояния транспортных средств, является накопление большого количества статистических данных, выборки которых для дальнейшего моделирования небольшими АТП являются непрезентативными. Анализ существующих концепций моделирования количества запасных частей приводит к необходимости разработки более упрощенной модели. В статье предлагается использование базы знаний для формирования и использования аналитических зависимостей в виде ведущих функций отказов. Разработанный алгоритм анализа параметров подвижного состава с использованием базы знаний позволяет сократить время моделирования для определения количества запчастей на планируемый период. Предложенная концептуальная модель отличается от существующих усовершенствованным алгоритмом с наличием базы знаний. Наиболее привлекательным сегментом рынка для практического использования модели являются небольшие АТП.*

**Ключевые слова:** АТП, прогнозирование количества запчастей, база знаний, алгоритм анализа параметров подвижного состава, концептуальная модель.

**Petrovsky A.V. Petrovsky V.P. CONCEPTUAL MODEL OF DETERMINING THE PREDICTED AMOUNT OF REPAIR PARTS TAKING INTO ACCOUNT SMALL RETRIEVALS OF STATISTICAL DATA**

*Work planning of automobile operating companies for the proper period considerably influences prediction of specific expenses, including expenses related to purchasing and setting of spare parts. An additional factor, that complicates prediction of transport vehicles technical state evaluation is the accumulation of plenty of statistical data, samples of which are not presentable for further modelling by small automobile operating companies. Analysis of present concepts of spare parts modelling results in necessity of a more simplified model development. In the article there is suggested the use of knowledge base for formation and use of analytical relations in the form of leading functions of refuses. The developed algorithm of analysis of mobile composition parameters with the use of knowledge base, allows shortening time to determine the amount of spare parts for a planned period. The presented concept model differs from the existing ones by the improved algorithm with the presence of knowledge base. The most attractive market segment for the practical use of the model is by small automobile operating companies.*

**Keywords:** automobile operating company, prognostication amount of spare parts, base of knowledges, algorithm of analysis of mobile composition parameters, conceptual model.

© Петровський А.В., Петровський В.П.

Статтю прийнято  
до редакції 7.11.14

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Алексенко В.Л., старший викладач кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки	Херсонська державна морська академія
Алексеев О.В., аспірант	Херсонська державна морська академія
Бачинський Ю.Г., к.т.н., доц. кафедри фізики та методики її викладання	Тернопільський національний педагогічний університет імені В. Гнатюка
Биба Є.Г., молодший науковий співробітник кафедри ВТМіПМ	Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ
Браїло М.В., асистент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки	Херсонська державна морська академія
Букетов А.В., д.т.н., проф., завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки	Херсонська державна морська академія
Васюхін М.І., д.т.н., проф. кафедри комп'ютерних мереж та телекомунікацій	Національний університет біоресурсів та природокористування України, м. Київ
Вільський Г.Б., к.т.н., доц., ректор	Міжнародний технологічний університет «Миколаївська політехніка»
Гнатов А.В., д.т.н., проф. кафедри автомобільної електроніки	Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Голотенко О.С., асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій	Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Горбов В.М., д.т.н., проф., завідувач кафедри суднових та стаціонарних енергетичних установок	Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв
Гусев В.М., директор Професійного ліцею	Херсонська державна морська академія
Долинний В.В., аспірант	Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, м. Київ
Євдокімова В.А., к.т.н., викладач Морського коледжу Херсонської державної морської академії	Херсонська державна морська академія

Іваник Ю.Ю., аспірант	Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, м. Київ
Ільницька С.І., к.т.н., старший науковий співробітник	Національний авіаційний університет, м. Київ
Калинчак В.В., д.т.н., проф., завідувач кафедри теплофізики	Одеський національний університет імені І. І. Мечнікова
Касім А.М., к.т.н., науковий співробітник	Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, м. Київ
Кириллова О.В., к.т.н., доцент кафедри «Морські перевезення»	Одеський національний морський університет
Коробко В.В., к.т.н., доц.	Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв
Лещенко О.В., асистент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки	Херсонська державна морська академія
Літвінова М.Б., к.ф.-м.н., доцент кафедри фізико-математических дисциплін	Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
Лобода П.І., д.т.н., проф., декан	Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ
Малашенко В.О., д.т.н., проф.	Національний університет «Львівська політехніка»
Мітенкова В.С., к.т.н., доцент кафедри суднових та стаціонарних енергетичних установок	Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв
Михайлик В.Д., д.т.н., проф.	Херсонський державний університет
Мініцький А.В., к.т.н., старший науковий співробітник	Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ
Моїсеєнко Л.Л., к.т.н., доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки	Херсонська державна морська академія

Наговська І.В., аспірант відділу водневих технологій та гідридного матеріалознавства	Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів
Настасенко В.О., к.т.н., доц., професор кафедри суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки	Херсонська державна морська академія
Нігалатий В.Д., старший викладач кафедри суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки	Херсонська державна морська академія
Овчарук О.М., к.т.н., доцент кафедри суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки	Херсонська державна морська академія
Погребняк І.Ф., аспірант	Херсонський національний технічний університет
Прокоп'юк В.А., аспірант кафедри фізики та методики її викладання	Тернопільський національний педагогічний університет імені В. Гнатюка
Проценко В.О., к.т.н., доцент кафедри суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки	Херсонська державна морська академія
Рожков О.С., д.т.н., доц., завідувач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики	Херсонська державна морська академія
Сапронов О.О., к.т.н., старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки	Херсонська державна морська академія
Селіванов С.Є., д.т.н., проф., завідувач кафедри управління судном та безпеки життєдіяльності на морі	Херсонська державна морська академія
Симаненков А.Л., аспірант	Херсонська державна морська академія
Скирденко В.О., аспірант	Херсонська державна морська академія
Скирденко О.І., к.т.н., доц.	Херсонський державний університет
Ткаченко О.М., к.т.н., доцент кафедри технологій програмування	Національний університет біоресурсів та природокористування України, м. Київ

Товстокорий О.М., к.т.н., доцент кафедри управління судном та безпеки життєдіяльності на морі	Херсонська державна морська академія
Тригуб С.М., к.т.н., доц., директор Морського коледжу	Херсонська державна морська академія
Федоров В.В., д.т.н., проф., завідувач відділу водневих технологій та гідридного матеріалознавства	Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів
Худяков І.В., викладач	Херсонське морехідне училище рибної промисловості
Чередниченко А.К., к.т.н., доцент кафедри суднових та стаціонарних установок	Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв
Черненко О.С., к.ф.-м.н., старший викладач кафедри теплофізики	Одеський національний університет імені І. І. Мечнікова
Шарко О.В., д.т.н., проф.	Херсонський національний технічний університет
Штанько О.Д., к.ф.-м.н., доцент кафедри фізико-математических дисциплін	Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

## ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

### А

Алексенко В.Л., 132  
Алексеев О.В., 220

### Б

Бачинський Ю.Г., 157  
Білошицький С.А., 132  
Биба Є.Г., 137  
Брайло М.В., 132  
Букетов А.В., 132, 141

### В

Васюхін М.І., 228  
Вільський Г.Б., 4

### Г

Гнатов А.В., 150  
Годованюк С.П., 14  
Голотенко О.С., 197  
Гончаренко А.В., 22  
Горбов В.М., 28  
Гусев В.М., 39

### Д

Долинний В.В., 228

### Є

Євдокимова В.А., 106

### І

Ісаєв Є.О., 47  
Іваник Ю.Ю., 228  
Ільницька С.І., 235

### К

Калинчак В.В., 124  
Касім А.М., 228  
Кириллова О.В., 55  
Клевцов К.М., 213  
Коленко В.В., 242  
Коркіна Є.П., 106  
Коробко В.В., 69

### Л

Лещенко О.В., 197  
Літвінова М.Б., 97  
Лобода П.І., 137  
Львов В.Є., 77

### М

Малашенко В.О., 179  
Мітенкова В.С., 28  
Михайлик В.Д., 213  
Мініцький А.В., 203  
Моїсеєнко Л.Л., 141

### Н

Наговська І.В., 157  
Настасенко В.О., 113, 166  
Нігалатій В.Д., 173

### О

Овчарук О.М., 185

### П

Петровський А.В., 247, 255  
Петровський В.П., 247, 255  
Погребняк І.Ф., 173  
Прокоп'юк В.А., 157  
Проценко В.О., 113, 185

### Р

Рожков О.С., 197

### С

Сапронов О.О., 197  
Селіванов С.Є., 124  
Сіманенков А.Л., 47  
Скирденко В.О., 141, 203  
Скирденко О.І., 213

### Т

Ткаченко О.М., 228  
Товстокорій О.М., 83  
Тригуб С.М., 124

### Ф

Федик В.В., 179  
Федоров В.В., 157

### Х

Хаєт Л.Г., 106  
Худяков І.В., 220

### Ч

Чередниченко А.К., 89  
Черненко О.С., 124

### Ш

Шарко О.В., 173, 213  
Штанько О.Д., 97

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті з результатами власних оригінальних досліджень, що мають наукову і практичну значущість і не публікувалися досі. До друку **не приймаються суто оглядові статті**. Відповідальність за зміст статті несе її автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

*Обсяг статей* – до 12 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути більше 30% обсягу основної частини.

*Оформлення статті*. На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

*Код УДК* – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

*Назва* – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

*Інформація про автора(ів)*: прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, повна назва установи або громадської організації, посада (для іноземних учасників – держава) – курсивом, по центру, розміром шрифту 12.

*Текст* надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

Параметри сторінки (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

розмір паперу – А4: 210\*297 мм;

орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);

поля – 2 см;

палітурка – 0 см;

колонтитули – 1,3 см;

абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки без нумерації.

*Формули* повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor 2.0, 3.0. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули (якщо такий є) теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять у тексті. Параметри в редакторі формул повинні точно відповідати наведеним нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити ...):

- Звичайний 12 пт.
- Крупний індекс 7 пт.
- Дрібний індекс 5 пт.
- Крупний символ 18 пт.
- Дрібний символ 12 пт.

*Таблиці* набираються у Microsoft Word.

*Рисунки* повинні бути чорно-білими і вставлені у файл і роздруковку статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word XP. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi. Рисунки можуть бути вставлені в текст за допомогою наступних команд:

- додати рис. – Рис. Microsoft Word;
- додати рис. – Bitmap Image;
- додати рис. – рис. Corel Draw.

*Структура статті*: вступ (постановка задачі або проблеми); рішення задачі (мета, задачі, об'єкти, предмети, методи дослідження); основні результати та висновки з перспективами; список використаних літературних джерел. Основні розділи можуть мати назви, відмінні від наведених вище найменувань.

*Список використаної літератури* подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування у тексті) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1 та вимогами, викладеними у Бюлетені ВАК України № 5 (2009).

*Анотації* українською, російською та англійською мовами обсягом від 100 до 250 слів, у яких відображається актуальність статті, основні результати дослідження та висновки, надаються мовою оригіналу статті перед вступом, на двох інших мовах – після тексту статті. У кінці анотацій наводяться ключові слова.

*Документи, що подаються до редакції.*

Для публікації автор повинен надати до редакційної колегії наукового журналу:

- комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft|Word|2000 for|Windows|. Машинописні рукописи не приймаються;
- файл кожного малюнка, включеного в статтю, окремо;
- рукопис статті (на паперовому носії), підписаний автором(ами) – 2 примірники.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- анотація та ключові слова українською, англійською і російською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів трьома мовами, – на окремій сторінці;

- зовнішня рецензія професора, доктора наук (редакційна колегія залишає за собою право направляти статті на додаткову рецензію);
- ліцензійний договір про передачу права на публікацію твору у відкритому доступі;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, ORCID (якщо є), наукові інтереси авторів) – на окремій сторінці.

Редакційна колегія залишає за собою право як не публікувати роботи у разі їх відхилення, так і приймати рішення щодо їх відповідності напрямам журналу. Рукописи авторам не повертаються.

**ЗМІСТ**

**МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ**

<b>СМЫСЛОВОЕ ПОЛЕ ЗАДАЧ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ</b> <i>Вильский Г.Б.</i>	<b>4</b>
<b>ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЭКИПАЖА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИТУАЦИЯХ НА МОРСКОМ СУДНЕ, ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ОТБОР И ПОДГОТОВКА</b> <i>Годованюк С.П.</i>	<b>14</b>
<b>PREFERENCES DISTRIBUTIONS DENSITIES FOR A COMMON CONTINUOUS ALTERNATIVE</b> <i>Goncharenko A.V.</i>	<b>22</b>
<b>АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ВЫБОРЕ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ БАЛЛАСТА</b> <i>Горбов В.М., Митенкова В.С.</i>	<b>28</b>
<b>УПРАВЛЕНИЕ СНИЖЕНИЕМ УРОВНЕЙ ВИБРАЦИИ И ШУМА, ОРГАНИЗАЦИЯ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ И ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ НА МОРСКИХ СУДАХ</b> <i>Гусев В.Н.</i>	<b>39</b>
<b>ОЦЕНИВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВЫХ ДВС</b> <i>Исаев Е.А., Симаненков А.Л.</i>	<b>47</b>
<b>ДО ПИТАННЯ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗПОДІЛУ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ МІЖ СУДНАМИ, ОБСЛУГОВУЮЧИМИ МАГІСТРАЛЬНО-ФІДЕРНІ ЛІНІЇ</b> <i>Кириллова О.В.</i>	<b>55</b>
<b>МОЖЛИВІ ШЛЯХИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕПЛОВИХ МАШИН В СИСТЕМАХ СЕУ</b> <i>Коробко В.В.</i>	<b>69</b>
<b>ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ</b> <i>Львов В.Е.</i>	<b>77</b>
<b>ПРИЧИНЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОЛЮСА ПОВОРОТА</b> <i>Товстокорый О.Н.</i>	<b>83</b>
<b>ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА В ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБИННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ</b> <i>Чередниченко А.К.</i>	<b>89</b>

<b>СУДНОВИЙ ВІТРОГЕНЕРАТОР КОЛИВАЛЬНОГО ТИПУ</b>	<b>97</b>
<i>Штанько О.Д., Літвінова М.Б.</i>	
<b>ПРОБЛЕМИ ВИЩОЇ ШКОЛИ</b>	
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕНОМЕНА ИНИЦИАЦИИ В СИСТЕМЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ</b>	<b>106</b>
<i>Евдокимова В.А., Коркина Е.П., Хаев Л.Г.</i>	
<b>АЛГОРИТМ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМПЕТЕНТНІСНОГО ПІДХОДУ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК</b>	<b>113</b>
<i>Проценко В.О., Настасенко В.О.</i>	
<b>РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА</b>	
<b>ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕННЯ ПОРИСТОЙ САЖИСТОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b>	<b>124</b>
<i>Селиванов С.Е., Тригуб С.Н., Калинин В.В., Черненко А.С.</i>	
<b>ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ</b>	
<b>КОМПЕНСАЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	<b>132</b>
<i>Алексенко В.Л., Букетов А.В., Браило Н.В., Белошицкий С.А.</i>	
<b>ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТУ Ti-TiV-TiC</b>	<b>137</b>
<i>Биба Є.Г., Лобода П.І.</i>	
<b>ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З НАПОВНЮВАЧАМИ РІЗНОЇ ДИСПЕРСНОСТІ ТА ПРИРОДИ</b>	<b>141</b>
<i>Букетов А.В., Скирденко В.О., Моїсеєнко Л.Л.</i>	
<b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ОПЕРАЦИИ ВНЕШНЕЙ БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ</b>	<b>150</b>
<i>Гнатов А.В.</i>	
<b>ВПЛИВ ДОМШОК ВТІЛЕННЯ (H<sub>2</sub>,C) НА ПРОЦЕСИ МАГНІТНОГО І АТОМНОГО ВПОРЯДКУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНВАРНОГО СПЛАВУ Н36</b>	<b>157</b>
<i>Наговська І.В., Федоров В.В., Прокоп'юк В.А., Бачинський Ю.Г.</i>	
<b>О ВОЗМОЖНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЧИСЛОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ И ИХ УТОЧНЕНИИ</b>	<b>166</b>
<i>Настасенко В.А.</i>	

---

<b>ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ</b>	<b>173</b>
<i>Нигалатий В.Д., Погребняк И.Ф., Шарко А.В.</i>	
<b>ПЕРЕДАВАННЯ ЕНЕРГІЇ ОПОРНО-ПОВОРОТНИМ ПРИСТРОЄМ КРАНІВ</b>	<b>179</b>
<i>Малащенко В.О., Федик В.В.</i>	
<b>ОБґУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВАЖІЛЬНОГО ПРИВОДУ РУЛЬОВОЇ МАШИНИ</b>	<b>185</b>
<i>Овчарук О.М., Проценко В.О.</i>	
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНИХ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ НАНОТРУБКАМИ</b>	<b>197</b>
<i>Сапронов О.О., Рожков О.С., Лещенко О.В., Голотенко О.С.</i>	
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ З ЧАСТКАМИ ФЕРО- І ПАРАМАГНІТНОЇ ПРИРОДИ</b>	<b>203</b>
<i>Скирденко В.О., Мініцький А.В.</i>	
<b>СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАГНИТНЫХ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПОЛЯХ</b>	<b>213</b>
<i>Скирденко О.И., Клевцов К.М., Шарко А.В., Михайлик В.Д.</i>	
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕЛИЧИНИ ЗАТЯГУВАННЯ МЕМБРАНИ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТИСКУ НА ЇЇ ГЕОМЕТРІЮ</b>	<b>220</b>
<i>Худяков І.В., Алексеев О.В.</i>	
<b>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ</b>	
<b>ОНТОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ БАЗИ КАРТОГРАФІЧНИХ ДАНИХ ГІС ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА</b>	<b>228</b>
<i>Васюхін М.І., Ткаченко О.М., Касім А.М., Іваник Ю.Ю., Долинний В.В.</i>	
<b>ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОБРАХУНКІВ ІНТЕГРОВАНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЗА РАХУНОК ЕКОНОМНОГО МЕТОДУ ОБЕРТАННЯ МАТРИЦЬ</b>	<b>235</b>
<i>Ільницька С.І.</i>	
<b>ВИКОРИСТАННЯ КРИПТОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОННИХ ДОКУМЕНТІВ</b>	<b>242</b>
<i>Коленко В.В.</i>	
<b>МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНИХ ЗАМОВЛЕНЬ З ФУНКЦІЄЮ ТРАНСПОРТНИХ ВИТРАТ ДРІБНОПАРТІЙНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ДОВАНТАЖЕННЯМ</b>	<b>247</b>
<i>Петровський А.В., Петровський В.П.</i>	

---

<b>КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГНОЗОВАНОЇ КІЛЬКОСТІ ЗАПЧАСТИН З УРАХУВАННЯМ МАЛИХ ВИБІРОК СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ</b>	<b>255</b>
<i>Петровський А.В., Петровський В.П.</i>	
<b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ</b>	<b>260</b>
<b>ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК</b>	<b>264</b>
<b>ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ</b>	<b>265</b>

Науковий журнал

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

№ 2 (11), 2014

Відповідальний за випуск *Р.Є. Врублевський*  
Технічний редактор *О.Ю. Клементьєва*  
Коректор *К.О. Надточій, В.В. Петренко*  
Друк, фальцювальні-палітурні роботи *В.Г. Удов*

Підписано до друку 26.12.2014. Формат 84×108/32.  
Папір офсетний.  
Ум. др. арк. 24,0. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012  
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20