

KISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (16)

Херсон
2017

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2017. – № 1 (16). – 240 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 16 від 26.06.2017 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., Наказ МОН України № 374 від 13.03.2017 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, 2017

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПОДЪЕМНОГО УГЛА ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ С ТЯЖЕЛЫМИ И НЕГАБАРИТНЫМИ ГРУЗАМИ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СУДАХ

Бень А. П., к.т.н., доцент, проректор по научно-педагогической работе Херсонской государственной морской академии, e-mail: a_ben@i.ua

Соловей А. С., аспирант кафедры судовождения и безопасности жизнедеятельности Херсонской государственной морской академии, e-mail: oleksandr_79@ukr.net

В статье рассмотрены вопросы усовершенствования методов контроля подъемного угла (Hoisting angle) во время проведения грузовых операций с тяжелыми и негабаритными грузами на специализированных судах (типа Heavy Lift). Предложены подходы к совершенствованию типовой методики выполнения грузовых операций на таких судах путем использования системы поддержки принятия решений, осуществляющей мониторинг и управление рядом параметров судна: количеством балласта и его распределением в балластных танках, углом крена судна, метацентрической высотой, нагрузкой на гак, вылетом стрелы, скоростью ветра, периодом качки. Использование предложенной методики по созданию систем поддержки принятия решений при проведении грузовых операций с тяжелыми и негабаритными грузами на специализированных судах, позволит при существующем уровне оборудования снизить уровень риска, повысит безопасность этих операций, снизит экономические затраты за счет сокращения времени грузовых операций.

Ключевые слова: подъемный угол, система поддержки принятия решений, тяжелые негабаритные грузы, специализированные суда Heavy Lift.

Введение. В настоящее время существенно возрастает число морских перевозок на специализированных морских судах (Heavy Lift Carrier). При осуществлении грузовых операций с тяжелыми негабаритными грузами важной научно-практической задачей является контроль параметров остойчивости судна.

Нарушение остойчивости при погрузке и выгрузке судна, особенно в тех случаях, когда грузовые операции осуществляются судовыми грузовыми кранами или грузовыми стрелами может привести к появлению опасного крена и наваливанию судна на причал.

Резкое увеличение крена судна в сторону причала при погрузке и выгрузке может стать причиной повреждений груза, корпуса судна, береговых сооружений, смещению и утрате других раскрепленных палубных грузов, а также другим потерям, включая человеческие жертвы.

Актуальность исследования. Вопросам повышения безопасности при проведении грузовых операций уделяется особенное внимание в крупнейших судоходных компаниях, таких как Jambo Shipping, BigLift Shipping, Hansa Heavy Lift, BBC Chartering, Intermarine, SAL (Schiffahrtskontor Alles Land), Harren & Partner.

В ряде работ [2–7] исследуются процедуры проведения грузовых операций с тяжелыми негабаритными грузами (Guideline for Project Cargo Operations), разработанные в соответствии с требованиями нормативных документов Международной морской организации (ИМО), например IMO Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing.

Многообразие решаемых судоводителем задач при реализации технологического процесса погрузки тяжелого негабаритного груза, протекающее в общем случае в условиях неопределенности, обуславливает необходимость создания специализированных систем поддержки принятия решений (СППР), позволяющих существенно повысить качество управления процессом погрузки.

По результатам анализа видно, что создание систем контроля параметров остойчивости является актуальным исследованием, направленным на повышение безопасности при осуществлении грузовых операций.

Цель статьи. Целью настоящей статьи является определение группы ключевых параметров, характеризующих процессы выполнения грузовых операций с тяжелыми негабаритными грузами и определение методики контроля подъемного угла для повышения безопасности выполнения таких операций.

Основной материал. Для того, чтобы определить возможность возникновения опасного накренения в процессе погрузки и выгрузки судна судоводителями могут быть произведены предварительные расчеты, которые позволят найти параметры остойчивости и оценить углы крена, которые могут возникнуть на судне при последующих погрузочно-разгрузочных операциях [3]. При выполнении грузовых операций с тяжелыми и негабаритными грузами судоводителю, управляющему и контролирующему процесс погрузки тяжелых и негабаритных грузов судовыми кранами на судно, приходится сталкиваться с проблемой постоянного контроля нескольких параметров, влияющих на остойчивость судна, а как следствие на безопасность проведения грузовых операций.

Все эти параметры можно разделить условно на две группы: статические параметры и динамические параметры [8, 10].

К *статическим* параметрам можно отнести:

- масса груза;
- расположение центра тяжести груза;

Группу *динамических* параметров составляют:

- поперечная метацентрическая высота GM (расчет этого параметра должен производиться как минимум для 3х этапов погрузки/выгрузки – GM начальная, GM при отрыве груза, GM при пересечении линии борта судна, GM при касании грузом палубы:

$$GM = KM - KG; \quad (1)$$

- где KM – возвышение метацентра судна над килем, KG – возвышение центра тяжести судна над килем;

- угол крена (учет этого параметра должен производиться на всем протяжении грузовой операции, и не должен превышать, 3^0-5^0):

$$tg\theta = \frac{w \cdot L \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta}{(W + w) \cdot GM - w \cdot (RG + L \cdot \sin\alpha)}; \quad (2)$$

- где W – водоизмещение судна, w – масса единицы груза, α – угол наклона стрелы, β – угол вылета стрелы, L – длина стрелы, RG – расстояние между центром тяжести судна и точкой крепления стрелы;

- масса (объем) балласта, необходимого для компенсирования массы груза при погрузке/выгрузке:

$$S = \frac{(P + Q + R) \cdot (\frac{B}{2} + a)}{S_y}; \quad (3)$$

где P – масса единицы груза, Q – креновая масса стрелы судового крана, R – масса оснащения для подъема, B – теоретическая расчетная ширина судна, a – максимальный вылет стрелы при погрузке единицы груза, S_y – расстояние между центрами тяжести креновых танков правого и левого бортов судна.

- нагрузка на гак грузовой стрелы судового крана (Hook Load);
- подъемный угол (Hoisting angle) – угол отстояния линии подъемного троса от вертикали, значение этого параметра должно быть максимально сведено к нулю);
- вылет стрелы судового крана (Outreach) – от величины этого параметра зависит безопасная рабочая нагрузка на стрелу крана (SWL), а соответственно и лимит нагрузки на гак стрелы.

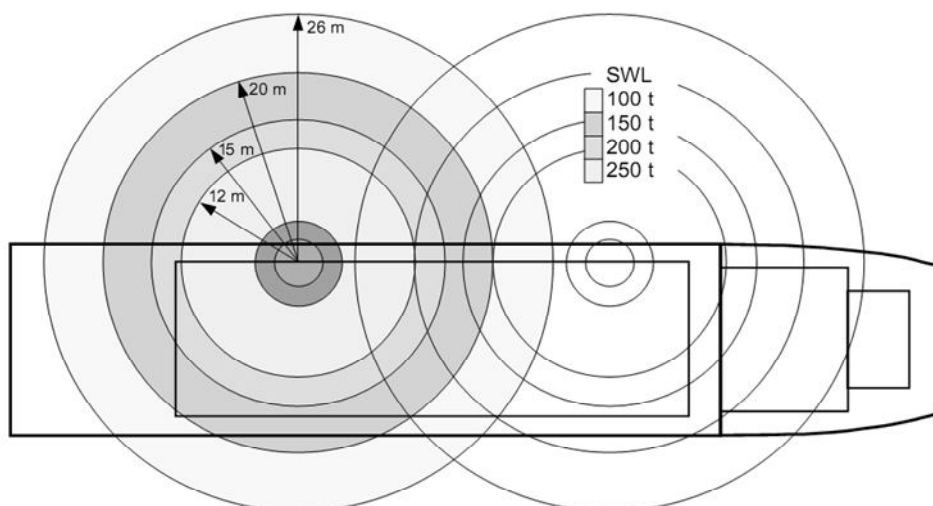


Рисунок 1 – Диаграмма зависимости SWL от вылета стрелы судового узла

Одной из сложных задач, от решения которой зависит безопасность проведения грузовых операций, при которых необходимо свести к минимуму риски связанные с повреждением груза, корпуса судна, береговых сооружений, смещением и утрате других раскрепленных палубных грузов, а также другим потерям, включая человеческие жертвы, является задача сведения к минимуму величины подъемного угла (Hoisting angle) [9].

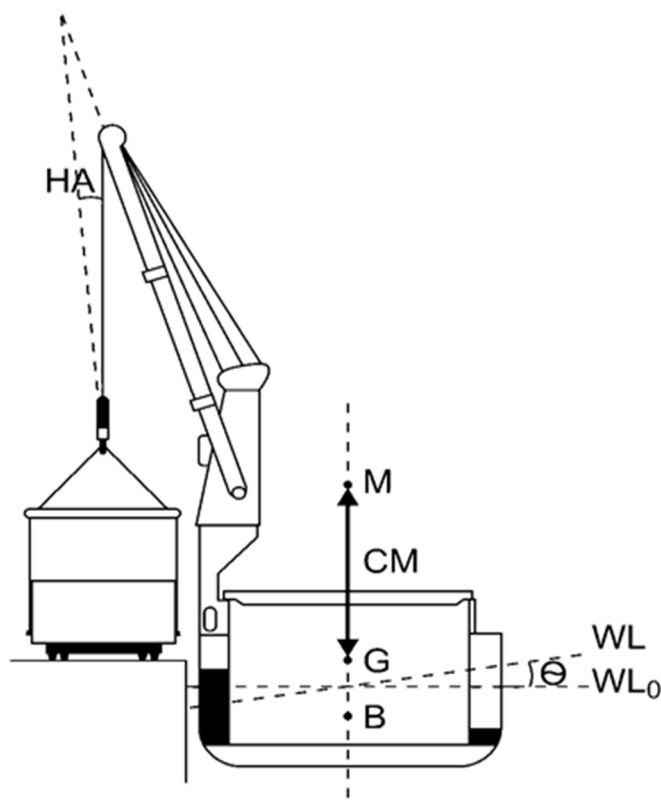


Рисунок 2 – Контролируемые параметры при погрузке тяжелых грузов:
 WL – ватерлиния, HA – подъемный угол, (Hoisting angle), Θ – угол крена судна,
 M – метациентр судна, GM – поперечная метациентрическая высота судна,
 B – центр плавучести судна, G – центр тяжести судна

Подъемный угол (Hoisting angle) – это угол отстояния линии подъемного троса от вертикали (рис. 1). Наличие Hoisting angle, величина которого отличается от нулевого значения на несколько градусов, неизбежно приводит к смещению тяжелого негабаритного груза при подъеме его судовым краном.

Зависимость критической нагрузки на гак судового крана, при которой происходит смещение (скольжение) тяжелого негабаритного груза, от подъемного угла при наиболее распространенном коэффициенте скольжения $\mu=0,3$ представлена в табл. 1.

Такого рода табличные зависимости приведены в руководствах по проведению грузовых операций [1].

Табл. 1 – Зависимость критической нагрузки на гак стрелы от подъемного угла

Подъемный угол (Hoisting angle)	1°	2°	3°
Критическая нагрузка на гак стрелы (в процентах от массы груза)	95 %	90 %	85 %

Как видно из табл. 1, при массе груза например 100т и при подъемном угле 3° неконтролируемое смещение (скольжение) груза произойдет при нагрузке на гак 85 т. Из практики проведения грузовых операций с тяжелыми негабаритными грузами известно, что такая ситуация чревата повреждением груза, корпуса судна, береговых сооружений.

По этой причине при проведении погрузки тяжелых грузов, когда остается около 15–20 % нагрузки от веса груза на причале и соответственно 75–80 % нагрузки на гак судовой стрелы, необходимо уменьшить величину подъемного угла (Hoisting angle) до значения близкого к нулю. Обычно в морской практике судов-тяжеловозов это осуществляется посредством изменения угла крена судна с помощью антикреновой балластной системы, а также изменением угла наклона стрелы [10].

В качестве одного из способов контроля подъемного угла (Hoisting angle) на минимальном уровне можно применить следующий способ, который известен в современной морской практике. Это так называемый способ фиксации контрольного угла крена. Данный способ можно разделить на следующие основные этапы:

1. Закрепить подъемные стропы в точках крепления груза, при этом подъемный угол уменьшить до значения близкого к нулю посредством изменения угла наклона стрелы крана.
2. Зафиксировать значение контрольного угла крена (Control heel) при подъемном угле равном нулю (например Control heel равен 1° PS).
3. Пошаговыми действиями (step-by-step), увеличивая постепенно нагрузку на гак судового крана и компенсируя появляющийся крен судна с помощью креновых балластных танков (перемещая балласт из креновых танков с левого на правый борт), довести нагрузку на гак до 90–95 % от массы груза.
4. На последнем этапе необходимо добиться того, чтобы отрыв груза от причала был произведен при угле крена равном значению контрольного угла (в нашем случае 1° PS). В этом случае подъемный угол при отрыве груза от причала, автотранспортера, баржи и т.д. будет равен нулю.

Преимуществом предложенного способа по сравнению с имеющимися является его сравнительная простота использования и то, что данный подход не требует сложных и дорогостоящих технических решений.

Поскольку процесс управления погрузкой тяжелого негабаритного груза на специализированное судно осуществляется в режиме реального времени, крайне важным является оперативность принятия управленческих решений в процессе погрузки.

Решение этой задачи может быть обеспечено путем использования системы поддержки принятия решения (СППР) по управлению динамическими параметрами, контролируемые при погрузке тяжелых и негабаритных грузов. Данная СППР должна содержать базу правил по принятию решений, которая анализируют изменение этих динамических параметров и рекомендует лицу, принимающему решения (судоводитель),

внесение изменений в процесс погрузки/выгрузки, гарантирующих безопасное проведение грузовых операций. Например: при росте нагрузки на гак стрелы судового крана увеличивается крен судна на борт, с которого поднимается груз, а поперечная метацентрическая высота (GM) уменьшается. Максимальное изменение (уменьшение) GM будет в момент отрыва груза от причала. При одновременном росте крена судна в этот момент возрастает риск опрокидывания судна, и для того, чтобы его снизить, надо переместить необходимое количество балласта на противоположный борт судна.

Разработка таких СППР и решение оптимизационных задач сталкивается с рядом трудностей, связанных с особенностями процесса погрузки/выгрузки грузов, среди которых необходимо отметить следующие:

- сложность математической модели процесса управления погрузкой/выгрузкой;
- необходимость контроля большого количества параметров в режиме реального времени;
- необходимость выполнения нормативных требований, регламентирующих требования безопасности, в процессе погрузки/выгрузки на судне.

При создании специализированных СППР необходимо формировать базу знаний по процедурам погрузки/выгрузки, уже отработанным на реальных примерах в практике морского судоходства, и использующих методы многокритериальной оптимизации для решения задач выбора наилучших управляющих воздействий для конкретного процесса погрузки/выгрузки.

Таким образом, для эффективного решения задачи контроля подъемного угла (НА) во время проведения грузовых операций с тяжелыми негабаритными грузами на специализированных судах необходимо разработать математическую модель контроля параметров (подъемный угол НА, поперечная метацентрическая высота GM, угол крена, количество балласта), влияющих на погрузку судна при осуществлении таких операций, с последующим решением многокритериальной оптимизационной задачи выбора из значений для обеспечения требуемого уровня безопасности выполнения этих операций.

Выводы. Использование предложенной методики по созданию систем поддержки принятия решений при проведении грузовых операций с тяжелыми и негабаритными грузами на специализированных судах, оборудованными собственными кранами, позволит при существующем уровне оборудования снизить уровень риска возникновения несчастных случаев при выполнении грузовых операций, повысит безопасность этих операций, снизит экономические затраты за счет сокращения времени грузовых операций, уменьшит влияние так называемого «человеческого фактора» на процесс их выполнения.

REFERENCES

1. BBC Guideline. Safe solutions for project cargo operations. – Leer : BBC Chartering and Logistic GmbH&Co.KG, 2009. – 76 p.
2. HMC,C.(2014,July18).The thialf heavy lifting vessel. Retrieved from <http://hmc.heerema.com/content/fleet/thialf/>
3. *van Hoorn, Frank (2008), «Heavy-lift transport ships-Overview of existing fleet and future developments», in Choo, Yoo Sang; Edelson, David N., Marine Operations Specialty Symposium, Singapore: Research Publishing Services, pp. 83–99.*
4. Heavy-Lift Transport Ships - Overview of Existing Fleet and Future Developments, presented at the MOSS 2008 conference in Singapore, March 5-7, 2008. MOSS paper 32;
5. Heavy-Lift Ships, Chapter 52 of the updated «Ship Design & Construction», Vol. 2, published by SNAME, June, 2004.
6. XZhao,RogerXu, and Chiman Kwan. Ship-motion prediction: algorithms and simulation results.In Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings.(ICASSP'04). IEEE International Conference on, volume5,page5–125.IEEE,2004.
7. Noble Denton document 0027/ND - Guidelines for Marine Lifting Operations.

8. E.Barlow,D/ Tezcaner Ozturk. A support tool for assessing the risks of heavy lift vessel logistics in the installation of offshore windfarms. MarineHeavyTransport&LiftIV,2014.
9. GL Noble Denton. Guidelines for marine lifting and lowering operations. Technical Report0027/ND, GL Noble Denton, June 2013.
10. Ershov A. A. (2002) Kontrolj ostoyjchivosti i posadki sudna pri pogruzke i vihgruzke. – Sankt-Peterburg, Izdatelstvo GMA im. adm. S. O. Makarova.

Бень А. П., Соловей О. С. ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ПІДЙОМНОГО КУТА ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ВАНТАЖНИХ ОПЕРАЦІЙ З ВАЖКИМИ ТА НЕГАБАРИТНИМИ ВАНТАЖАМИ НА СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ СУДНАХ

У статті розглянуті питання удосконалення методів контролю підйомного кута (Hoisting angle) під час проведення вантажних операцій з важкими негабаритними вантажами на спеціалізованих суднах типу Heavy Lift. Запропоновані підходи до вдосконалення типової методики виконання вантажних операцій на таких суднах шляхом використання системи підтримки прийняття рішень, що здійснює моніторинг та керування низкою параметрів судна: кількістю баласту та його розподілом у баластних цистернах, кутом крену судна, метацентричною висотою, навантаженням на гак, вильотом стріли, швидкістю вітру, періодом хитаючи. Використання запропонованої методики по створенню систем підтримки прийняття рішень при проведенні вантажних операцій з важкими та негабаритними вантажами на спеціалізованих суднах, дозволить при існуючому рівні обладнання знизити рівень ризику, підвищити безпеку цих операцій, знизити економічні витрати за рахунок скорочення часу вантажних операцій.

Ключові слова: підйомний кут, система підтримки прийняття рішень, важкі негабаритні вантажі, спеціалізовані судна Heavy Lift.

Ben A. P., Solovey O. S. IMPROVEMENT OF METHODS OF CONTROL OF THE HOISTING ANGLE DURING CARGO OPERATIONS WITH HEAVY AND OVERSIZED CARGOES ON SPECIALIZED VESSELS

This article describes how to improve the methods of the lifting angle (Hoisting angle) control during cargo operations with heavy and oversized cargoes on specialized vessels (such as Heavy Lift). Authors suggested the approaches to improve standard procedure of loading operations on such vessels by using decision support system. This system executes monitoring and management of a number of vessel characteristics: quantity of ballast and its distribution in ballast tanks, heeling angle, metacentric height, hook load, boom outreach, windspeed and rolling period. Use of the proposed method for creating decision support systems during cargo operations with heavy and oversized cargoes on specialized vessels, will allow, with exciting equipment, to reduce risk, increase the safety of these operations, reduce economic costs by reducing the time of cargo operations.

Keywords: hoisting angle, decision support system, heavy lift cargo, heavy lift vessels.

© Бень А. П., Соловей О. С.

Статтю прийнято
до редакції 7.06.17

СООТНЕСЕННОСТЬ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА

Вильський Г. Б., PhD, доцент, ректор Международного технологического университета «Николаевская политехника», e-mail: g.vilsky@gmail.com

В статье рассматриваются методы и модели благодаря которым обеспечивается информационная безопасность мореплавания. Показаны характеристики и возможности существующего и нового созданного инструментария по экспонированию навигационно-информационного поля судовождения. Приведены результаты экспертной оценки соотнесенности методов и моделей информационной безопасности судоходства.

Ключевые слова: судно, навигационная экспозиция, информационная безопасность, метод, модель, квалитативность, оценка.

Постановка проблемы, актуальность, связь с государственными программами.

Существующее на судоходных морских путях информационное обеспечение оказывает управляющее влияние на безопасность движения судна, а в стеснённых условиях плавания на маневрирование и судовые потоки. В зависимости от состояния навигационно-информационного поля формируются причины возникновения опасностей и аварийные ситуации. До последнего времени, когда судно не рассматривалось объектом информационной безопасности водных путей, на второй план отходили учет постоянно расширяющихся факторов опасности морской экспозиции от непредсказуемости воздействий объёма поступающих данных о природных, техногенных, экономических и социально-политических изменениях в глобализованном судоходстве. При этом относительность реальности экспозиции навигационной обстановки на водном пути, в большинстве случаев, объясняется недостатками имеющихся научных инструментальных средств, отвечающих за адекватность освещения навигационной обстановки, искажение информационного пространства и ошибочной оценке ситуаций, что создаёт предпосылки аварийности. В связи с этим, инструментальные средства в виде методов, моделей и методик информационной безопасности судоходства имеют первостепенный приоритет в развитии систем управления движением судов (СУДС). Их функционирование относят к главным гарантам обеспечения достоверности, достаточности и своевременности управляемого морского контента. Рассмотрение научной и практической оценки соотнесённости созданных и разрабатываемых инструментальных средств информационной безопасности относится к актуальным вопросам морской отрасли, выполняется ведущими высшими учебными и научными морскими заведениями и отвечает требованиям Морской доктрины Украины на период до 2035 года.

Анализ публикаций и постановка задачи исследования. Разработку надёжных инструментальных средств и систем информационной безопасности судоходства (ИБС) специалисты отрасли относят к вопросам первостепенной важности. В морских публикациях последних 10 лет говорится, что примерно 40% происшествий с судами происходит из-за неадекватности информации циркулирующей на водных путях. При этом безопасное управление движением судов в прибрежных и стесненных водах связывается с качественным представлением и отображением информационного пространства судовождения [1]. В работе [2] выполнение оценки параметров экспозиции акватории морского района известными способами, методами и моделями отмечается как недостаточное либо оно вообще не проводится. Существующий научный инструментарий для решения задач отображения навигационно-информационного поля системно реализует повышение роста объёмов информационного обеспечения. При этом его качественная оценка показа многоэлементности информационного пространства судоходства в государственных системах управления движением судов не подвергается комплексной квалитативности.

Научные основы данного инструментария находятся в конгруэнтности экспертной информации и рассмотрены в [3]. Отмечается, что методы получения и анализа средств реализуются на базе: современной философии и политики информационной безопасности; общей теории управления, математического и компьютерного моделирования. Такое состояние не позволяет говорить о достаточности, системности и многомерности анализа при условии отсутствия критериальной экспертной оценки. В связи с этим разработанные методы и модели информационного обеспечения судоходства должны подвергаться сравнительному анализу с определением весовых критериальных коэффициентов [4]. Это подтверждается и тем, что последние достижения в научном инструментарии формирования обработки и контроля информационных потоков водных путей мало обеспечены соответствующими коэффициентами важности экспертной информации [5,6]. Вследствии этого в дальнейшей работе необходимо использование блока экспертных оценок для установления качественности научного инструментария информационного обеспечения судоходства.

Цель статьи. Представление методов и моделей, обеспечивающих информационную безопасность судоходства, показ результатов проведенного экспертного сравнительного оценивания их качественных показателей.

Изложение материала исследования. Поставленная цель исследования определяет необходимость решения методологических, теоретических и практических проблем информационного обеспечения СУДС. Соотнесённость теоретических методов и моделей ИБС устанавливается методами – дедукции результатов научных исследований, концептуальным, дескриптивным, математическим и имитационным моделированием, структурно-количественным анализом, а также матричным и графологическим расчетными методами. Все они позволяют выявить, определить и обосновать принципы формирования, структуру, качество и циркуляционный объем информационного пространства на водных путях, классифицировать и кластеризировать потоки информации, выдвинуть и обосновать методологию оценки информационной безопасности на маршруте движения судна. Методы математического моделирования используются в разработке базовых вероятностных моделей опасностей, а эмпирические – для изучения статистических данных различных типов аварийности судов.

В условиях действия конвенций международной морской организации (ИМО) и существующей парадигмы безопасности на море совокупность качества известных и предложенных методов и представлений, определений, ценностей и установок, которые разделяют морское научное сообщество, особенно заметна важность методов и моделей используемых в качестве инструментария безопасного судовождения. Речь идёт о расчетно-инструментальном штурманском методе в управлении движением судна, и его рабочими фрагментациями, применяемыми лоцманами-операторами служб регулирования движением судов. Данный метод включает одновременное использование совокупности методов картографического, специальной лоции и абсолютной навигации. В картографическом методе предусматривается непосредственное зрительное рассмотрение на географических картах динамики процессов движения судов по маршруту следования и установление взаимосвязей с текущим состоянием навигационно-информационного поля судовождения. Современной оригинальностью метода является использование, признанной ИМО технологии «Е-навигация», посредством которой осуществляется электронное картографическое отображение карт и местоположения судна, проведение прокладки трассы движения, контроль отклонений от заданного маршрута. Многофункциональность метода ставит его возможности по вычислению безопасных курсов, предупреждению судоводителя об опасностях, ведению электронного судового журнала и управлению авторулевым устройством на вершину современного обеспечения информационной безопасности судоходства.

Для руководства плаванием по определенным участкам водного пути используется «*Метод специальной лоции*». В методе охарактеризованы условия плавания в пределах

рассматриваемого района с учетом особенностей берегов и дна водоема, метеорологических и гидрологических условий, определяющих безопасность и удобства плавания. Базируясь на положениях «Общей лоции», он дает необходимые сведения о внутренних водных путях и содержит основные данные по гидрологии, картографии, ориентировке, выбору курса судна при движении по рекам, озерам, водохранилищам и вблизи морских побережий. Зная общую лоцию, судоводитель за более короткий срок легко и быстро осваивает метод специальной лоции, ориентируется на незнакомом участке пути.

Метод «абсолютной» навигации заменил обычные и проверенные морской практикой секстанты и базируется на технологиях спутниковых навигационных систем. Благодаря очень малой дискретности обсерваций и низкой стоимости малогабаритных и надежных приемников GPS-метод стал одним из основных навигационных инструментов на каждом морском судне. Повышенная надежность метода в определении места судна обеспечивается объединением приемников GPS-системы NAVSTAR с приемниками спутниковой системы ГЛОНАСС. Во многих сложных ситуациях маневрирования и расхождения судов такое комбинирование является обязательным, несмотря на меняющееся текущее состояние группировки спутников.

В последние годы для повышения безопасности движения судовые электро-радионавигационные системы подкреплены и дополнены **«Моделью автоматической идентификации судна»**. Данный инструментарий предназначен для поддержки безопасности судоходства посредством мониторинга морского трафика. Модель поддерживает обмен судовым статическим контентом, снабжает субъекты судоходства навигационными динамическими данными (положение, направление и скорость) между судами и базовыми станциями на суше, идентифицирует суда, их габариты, курс и другие данные с помощью радиоволн диапазона ОВЧ/УКВ.

«Лоцманский метод» не является инструментальным средством прямого действия, ориентирован на использования личного опыта судоводителей, достаточно широко распространён в судоходной практике для морских районов с прибрежными водными путями и стеснёнными условиями плавания. В силу своих персонифицированных оригинальностей и особенностей данный метод не входит в исследовательское поле настоящей работы.

В последнем десятилетии научные работы по обеспечению информационной безопасности широко распространяются в национальной сфере безопасности судоходства. При этом вновь созданные методы и модели, относящиеся к оценке информационных рисков движения судов, стали относить к инструментальным средствам кибербезопасности судоходства.

Среди приоритетных научных инноваций **«Модель информационного пространства мореплавания»**, отражающая смысловые категории потоков информации. В модели формализован процесс обмена данными, установлена приоритетность потоков, их внутренняя взаимосвязь и отношения судна, как объекта информационной безопасности, к источниками сведений и сообщений.

В **«Методом векторного поля угроз движению судов»** временная зависимость движения судна представляется вектором-функцией, а радиус-вектор перемещения центра тяжести судна, описывающий в пространстве годограф, воспроизводит кривую информационной безопасности с зонами влияния опасных судождению факторов. Научная фундаментальность присуща **«Методу формирования информационного поля движения»** в котором предусмотрено проведение теоретической оценки количества, энтропии и избыточности информационных потоков. В обязательность процедур входит построение строгих математических моделей, отображающих опасные факторы угроз и рисков в виде вероятностных поверхностей или столбчатых характеристик.

В важной и актуальной для судовладельцев **«Модели рисков судоходства»**, посредством идентификационной диаграммы отображаются установленные риски

информационной безопасности судна: «посадка на мель»; «столкновение»; «ледовый»; «техногенный» и «терроризм» вероятность, проявления которых наибольшая. С помощью встроеной матрицы уровней рисков комплексно дифференцируются угрозы и степени вероятности наступления рисков событий. При этом модель выступает инструментом в разработке планов переходов судна в районах с высокой аварийностью. **«Модель кластера информационной безопасности движения судов»** востребована менеджментом ходового мостика. В модели посредством алгоритма симметричной матрицы кластерных расстояний между предпосылками угроз и рисками информационной безопасности судна выполняются классифицирование и группирование неоднородных потоков морских данных, что крайне необходимо для планирования управления движением. В **«Метод гарантированной информационной безопасности судоходства»** строятся математические модели рисков судна с высокой и низкой степенью вероятности проявления, которые представляются математическими поверхностями информационной безопасности и вводятся в базу электронных моделей СУДС для проведения сопоставительного анализа с текущим состоянием информационной безопасности реального времени движения. В **«Модели дефиниции»** и паспорта **«Информационная Безопасность Судна»** собран руководящий контент, относящийся к безопасному оперированию с бортовым входящим и исходящим информационным документооборотом, что позволяет совершенствовать общую систему безопасности судоходства.

Таким образом, существующие методы и модели, на основе которых формируется информационное пространство судоходства и обеспечивается управление движением, реализуют его в разной качественной степени фрагментарности и без учёта особенностей опасностей на маршруте следования, что снижает эффективность систем регулирования движения судов, поскольку их технические средства не всегда выявляют факторы угроз безопасному движению судна и не прогнозируют степень влияния информационной безопасности на водном пути.

Отмеченные выше имеющие наибольшую применяемость методы и модели были подвергнуты соотнесённости в оценке на качественность. При проведении сравнительной оценки качественных показателей использовался один из методов ранговых преобразований, известный из теории квалиметрии, как **«Метод средних»**. Его выбор связан с возможностью применения весовых экспертных оценок, как некоторой меры рекуррентной процедуры с экспертными ответами. По каждому оцениваемому методу/модели эксперты предлагали числовые величины критериев и, как результат среднего, вносили их в табличную форму.

В качестве экспертов выбирались пять государственных лоцманов из морских лоцманских служб и служб регулирования движения судов. Критериями оценивания служили пять показателей, отражающих качественную сторону метода/модели, – наглядность, полнота данных, достоверность, целевое назначение, надёжность поддержки. Каждому лоцману-эксперту предлагалось реализовать блок экспертных оценок путём высказывания своего ответа-оценки отдельно по каждому критерию оценивания.

Первая оценка-ответ «Оценка» выставлялась исходя из общего представления соответствия данного метода/модели предложенному критерию по пятибалльной шкале. Вторая оценка-ответ учитывала значение «Весового индикатора критериев» в % выражении, служащего определителем отражения значимости, относительной важности, «веса» данного метода/модели в сравнении с другими, оказывающими влияние на процесс информационной безопасности. Третью результирующую оценку эксперты устанавливали путём умножения числовых значений первой и второй оценок, и таким образом представляли в баллах «Итоговую оценку».

Форма заполнения лоцманских экспертных ответов приведена в табл. 1. Среднее арифметическое значение «Итоговых оценок» каждому методу / модели определяло в баллах экспертную «Интегральную оценку».

Точность этих методов проверена опытом морской практики судовождения, наблюдением и экспертным анкетированием капитанов судов и лоцманов. Результаты отработанных экспертами документов табличной формы сведены в табл. 2, в которой представлена квалиметрия известных и предложенных методов и моделей обеспечения информационной безопасности судоходства.

Таблица 1 – Форма заполнения лоцманских экспертных ответов

<i>Научные показатели методов и моделей</i>				
№ П/П	<i>Критерий оценивания</i>	<i>ЭКСПЕРТ – морской лоцман</i>		
		<i>Блок экспертных оценок</i>		
		<i>Оценка, (балл)</i>	<i>Весовой индикатор, %</i>	<i>Итоговая оценка (балл)</i>
1.	Наглядность	4	70	2,8
2.	Полнота данных	3	50	1,5
3.	Достоверность	2	30	0,6
4.	Целевое назначение	3	60	1,8
5.	Надёжность поддержки	2	30	0,6
Интегральная оценка (балл)				1,46

Качественная критериальная оценка каждого из известных и предложенных методов и моделей познания уровня обеспечения информационной безопасности судоходства, проведенная группой лоцманов-экспертов, сделана с учётом их взаимной связанности, дополняемости и конкретизации, что повышает уверенность в успешном надёжном влиянии принимаемых решений на усиление безопасности движения судов. Разработанные и предложенные впервые модели и методы получили максимальные числовые значения в пять баллов и 100 %, имеют повышенную критериальную результативность в «Оценке», «Весовом индикаторе», «Итоговой оценке» и «Интегральной оценке».

Повышенные уровневые баллы объясняются высоким динамизмом отображения наглядности и простоты влияния на восприятие в реальном времени. Их одновременная представленность на борту судна и береговом посту регулирования движения судов повышает гарантию обеспечения информационной безопасности судна и судоходства в целом.

Особый приоритет и уровень критериальных оценок отнесен группой экспертов модели дефиниции и паспорту «Информационная Безопасность Судна». Индекс «Интегральной оценки» новых разработанных методов/моделей почти на 33 % превышает данный показатель для инструментальных средств, входящих в известный штурманский метод.

Таблица 2 – Качество методов и моделей ИБС

Признаки сверки	Название научной основы	Критерии оценки					Интегральная оценка (балл)	
		Наглядность	Полнота данных	Достоверность	Целевое назначение	Надёжность поддержки		
		Блок экспертных оценок						
		1. Оценка (балл). 2. Весовой индикатор (%). 3. Итоговая оценка (балл).						
НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СУДОХОДСТВА	ИЗВЕСТНЫЕ	Картографический метод	4	3	2	3	2	1,46
			70 %	50 %	30 %	60 %	30 %	
			2,8	1,5	0,6	1,8	0,6	
		Метод специальной лоции	4	4	3	4	4	2,20
			75 %	60 %	40 %	60 %	50 %	
			3,0	2,4	1,2	2,4	2,0	
		Модель автоматической идентификации судна	3	5	4	2	4	2,34
			60 %	70 %	80 %	40 %	60 %	
			1,8	3,5	3,2	0,8	2,4	
		Метод «абсолютной» навигации	5	4	4	3	5	2,98
			80 %	55 %	75 %	90 %	60 %	
			4,0	2,2	3,0	2,7	3,0	
	ПРЕДЛОЖЕННЫЕ	Модель информационного пространства мореплавания	5	4	3	4	4	2,90
			70 %	65 %	60 %	80 %	85 %	
			3,5	2,6	1,8	3,2	3,4	
		Метод векторного поля угроз движению судов	5	4	4	5	4	2,96
			60 %	50 %	70 %	80 %	75 %	
			3,0	2,0	2,8	4,0	3,0	
		Метод формирования информационного поля движения	4	4	4	5	4	2,97
			70 %	55 %	60 %	85 %	80 %	
			2,8	2,2	2,4	4,25	3,2	
		Модель рисков судоходства	4	4	4	5	5	3,20
			65 %	75 %	54 %	80 %	85 %	
			2,6	3,0	2,16	4,0	4,25	
Модель кластера информационной безопасности движения судов		5	3	4	5	5	3,34	
		80 %	70 %	65 %	85 %	75 %		
		4,0	2,1	2,6	4,25	3,75		
Метод гарантированной информационной безопасности судоходства		4	5	5	5	4	3,90	
		80 %	75 %	85 %	90 %	95 %		
		3,2	3,75	4,25	4,5	3,8		
Модель паспорта «Информационная безопасность судна»		5	4	4	5	5	4,10	
		90 %	85 %	80 %	98 %	90 %		
		4,5	3,4	3,2	4,9	4,5		

Висновки. Описані показателі методів і моделей, забезпечують інформаційну безпеку судноходства. Показана технологія експертного оцінювання, створеного наукового інструментарія і результати їх якісної співвіднесеності. Кваліметрія розроблених нових інструментальних засобів вигідно відрізняється від застосовуваних в морській практиці, а їх інтегральні оціночні показателі більше ніж на 1/3 перевищують функціонуючі сьогодні. Предложені методи і моделі дозволяють з високою точністю фіксувати базові інваріантні властивості різних типів суден, здійснювати обробку, узагальнення і використання первинних даних для забезпечення інформаційної безпеки судновождення.

СПИСОК ІСПОЛЬЗОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вильський Г. Б. Сучасний напрям інформаційної безпеки систем управління рухом суден / Г. Б. Вильський, М. М. Надич // Матеріали міжнародного наукового конгресу з розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та розбудови інформаційного суспільства в Україні (17–18 листопада 2011 року). – К. : УкрНЦ РІТ, 2011. – С.20–21.
2. Вильський Г. Б. Інформаційна безпека судновождення : монографія. – Миколаїв : Видавництво ФОП Швець В.Д., 2014. – 336 с.
3. Литвак Б. Г. Експертна інформація. Методи отримання і аналізу / Б. Г. Литвак. – М. : Радио и связь, 1982. – 185 с.
4. Коробов В. Б. Сравнительный анализ методов определения весовых коэффициентов. «влияющих факторов» / В. Б. Коробов // Социология. – 2005. – № 20. – С. 54–72.
5. Глотов В. А. Метод определения коэффициентов относительной важности / В. А. Глотов // Приборы и системы управления. – 1976. – №8. – С. 17–22.
6. Раев А. Г. Об одном способе определения весовых коэффициентов частных критериев при построении аддитивного интегрального критерия // Автоматика и телемеханика. – М. : Наука, 1984. – № 5. – С. 162–165.
7. Горницька Д. А. Визначення коефіцієнтів важливості для експертного оцінювання у галузі інформаційної безпеки / Д. А. Горницька, О. Г. Корченко, В. В. Волянська // Захист інформації. – 2012. – №1. – С. 108-121.

Вильський Г. Б. СПІВВІДНЕСЕНІСТЬ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА

В статті розглядаються методи і моделі, завдяки яким забезпечується інформаційна безпека мореплавання. Показані характеристики і можливості існуючого і нового створеного інструментарію по експонуванню навігаційно-інформаційного поля судновождення. Наведено результати експертної оцінки співвіднесеності методів і моделей інформаційної безпеки судноплавства.

Ключові слова: судно, навігаційна експозиція, інформаційна безпека, метод, модель, квалітативність, оцінка.

Vilskiy G. B. CORRELATION OF METHODS AND MODELS OF INFORMATION SECURITY OF NAVIGATION

The article deals with methods and models due to which information security of navigation is safeguarded. The characteristics and capabilities of the existing and newly created tools for exhibiting the navigational and information field of navigation are shown. The results of the expert evaluation of the correlation of methods and models of information security of navigation are presented.

Keywords: ship, navigation exposition, information security, method, model, qualification, evaluation.

© Вильський Г. Б.

Статтю прийнято
до редакції 12.05.17

УДК 656.61

БЕЗПЕКА ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В ЛЬODOVIХ УМОВАХ ЛОКАЛЬНО ОБМЕЖЕНОГО ПРОСТОРУ

Габрук Р.А., к.т.н., докторант Національного університету «Одеська морська академія», e-mail: grostyslav@yahoo.com

У роботі розглянуто питання навігаційної безпеки здійснення динамічного позиціонування рухомого об'єкта водного транспорту в умовах збурень чинників навколишнього середовища з урахуванням льодової обстановки локально обмеженого простору виконання технологічної роботи. Доведено актуальність питань навігаційної безпеки в льодових умовах Чорного та Азовського морів при розробці енергетичних ресурсів шельфу. Розроблено інфологічну модель гарантування безпеки, в фокусі якої є сформована система алгебраїчних нерівностей, що відображає співвідношення між силами і моментами збурень, та силами і моментами керованих реакцій рушійного комплексу. Практичне гарантування безпеки високоточної навігації досягається за рахунок підвищення рівня знань операторів систем динамічного позиціонування в режимі реального часу та у прогнозованому режимі, що має перспективу створення програмно-апаратних комплексів підтримки прийняття рішень, які можуть бути інтегровані з бортовим багатофункціональним комплексом навігаційного обладнання. Визначено перспективні напрями подальших наукових досліджень.

Ключові слова: система динамічного позиціонування, безпека мореплавства, судноводіння, рухомий об'єкт водного транспорту, льодові умови.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Подальше освоєння ресурсної бази вуглеводнів шельфу Чорного та Азовського морів відіграє провідну роль у становленні енергетичної безпеки України. Процес, що здійснюється на континентальному шельфі, включає розвідку нафтових і нафтогазових родовищ, буріння свердловин, видобуток нафти і попутного газу, трубопровідний транспорт нафти. Для забезпечення цього складного технологічного процесу використовується багато типів рухомих об'єктів водного транспорту (РОВТ). Сучасні РОВТ, що беруть участь у розробці ресурсів континентального шельфу, використовують системи динамічного позиціонування (СДП) під час виконання технологічних робіт у локально обмеженому просторі. За допомогою динамічного позиціонування (ДП) досягається оптимізація реалізації процесу високоточної навігації, що забезпечує високі показники комерційної експлуатації РОВТ. РОВТ з динамічними принципами позиціонування є перспективними типами РОВТ для високоєфективної розробки ресурсів континентального шельфу України.

Навігаційній безпеці при практичній реалізації процесу ДП в локально обмеженому просторі заважають чинники навколишнього середовища, що збурюють керований рух РОВТ.

Вітер, течія, хвилювання намагаються відхилити РОВТ від бажаної траєкторії руху або точки позиціонування. Проте вплив цих факторів прогнозується та відповідна інформація надається оператору системи динамічного позиціонування (ОСДП) у вигляді загальних діаграм [1].

Особливий практичний інтерес представляє коло питань безпеки ДП РОВТ в льодових умовах шельфу Чорного та Азовського морів. Поява льоду на Чорному морі, за винятком деяких ділянок, припадає, зазвичай, на середину грудня – першу половину січня. Причому спершу лід з'являється в гирлах великих річок. На Чорному морі лід переважно місцевого походження. Біля відкритих берегів найчастіше спостерігається дрейфуючий лід. Очищується море від льоду, як правило, у другій половині лютого – на початку березня.

Аномальні льодові режими – неоднаразове явище для Чорного та Азовського морів [2]. Зима 2011 – 2012 років в лютому виявилася однією з найбільш суворих у перші десятиліття ХХІ століття. Замерзла вся Одеська затока Чорного моря, замерз Дунай, було скуто льодом Керченську протоку. Аномальні льодові сезони із загрозою для безпеки

всього мореплавства трапляються в північно-західній частині Чорного моря не рідше одного разу на 10 років.

Суворі зими або окремі суворі зимові місяці на Чорному морі зумовлені постійними вторгненнями холодних мас повітря, так званими хвилями холоду. В різні пори року Чорне та Азовське моря знаходяться під впливом континентальних полярних і морських полярних, тропічних і арктичних повітряних мас. Взимку континентальне полярне повітря проникає на конинентальну частину з холодними сильними північно-східними вітрами. Ці процеси досягають максимуму в січні [3]. Морське полярне повітря потрапляє в акваторію Чорного моря з Атлантичного океану через Західну Європу. Його входження пов'язане з діяльністю циклонів.

Взаємодія льоду з корпусом РОВТ спричиняє до виникнення сил, що намагаються завадити керованому руху в локально обмеженому просторі при виконанні технологічної роботи, що пов'язана з ДП. Надійне та безаварійне ДП в льодових умовах гарантує безперервний ефективний видобуток необхідних ресурсів континентального шельфу. Саме тому питання безпеки ДП в льодових умовах є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано вирішення даної проблеми. Проблема ДП в льодових умовах та визначення властивостей льоду відносно молода, як і коло досліджуваних питань загальної льодової навігації.

В даний час відомо багато різних структурних типів льоду, їх фізико-механічні властивості є предметом вивчення провідних закордонних та вітчизняних вчених [4, 5]. Проблема взаємодії льоду з матеріалом корпусу РОВТ та визначення сил також належить до кола важливих питань, що підлягають всебічному вивченню [6].

Класифікація СДП включає в загальному вигляді 3 класи, які побудовано за принципом резервування обладнання згідно з [7]. Класифікаційні товариства до основного класу СДП можуть додавати додаткові символи. З усіх класифікаційних товариств стосовно льодових умов ДП тільки Germanischer Lloyd мала додатковий символ ICE (до об'єднання з Det Norske Veritas). Цей символ міг додаватися до СДП 2 або 3 класу. Для цього необхідно було, щоб РОВТ відповідав технічним вимогам [8]. Проте відсутнім є аналіз поведінки РОВТ в льодових умовах та його можливість здійснювати ДП під час льодових збурень.

Інші класифікаційні товариства висувають вимоги лише до льодового класу для здійснення загальної навігації, окремим випадком якої є ДП. Такий підхід не повною мірою забезпечує врахування процесів, що відбуваються при ДП в льодових умовах, залишаючи проблему оцінки безпеки динамічного позиціонування в льодових умовах відкритою.

Причини також обумовлені відсутністю аналітичних знань фундаментальної закономірності впливу льодової обстановки на безпеку ДП. Тому практично недостатньо повно сформовані інструктивна та методологічна бази для ОСДП стосовно прийняття рішень відносно безпеки ДП в льодових умовах.

Постановка задачі. Метою дослідження є пошук шляхів гарантування безпеки ДП РОВТ в льодових умовах локально обмеженого простору виконання технологічної роботи.

Викладення основного матеріалу дослідження. ДП в льодових умовах має проводитися підготовленими і відповідно класифікованими за конструкцією РОВТ. Характерними особливостями таких РОВТ є посилений набір корпусу, особлива форма носу, особливі «льодові» гвинти, особливе розміщення обладнання, систем та ін. Всі ці конструктивні особливості спрямовані на забезпечення конструктивної безпеки РОВТ та на поліпшення морехідних якостей при здійсненні високоточної навігації в льодових умовах відповідно до додаткового льодового знака до основного символу класу.

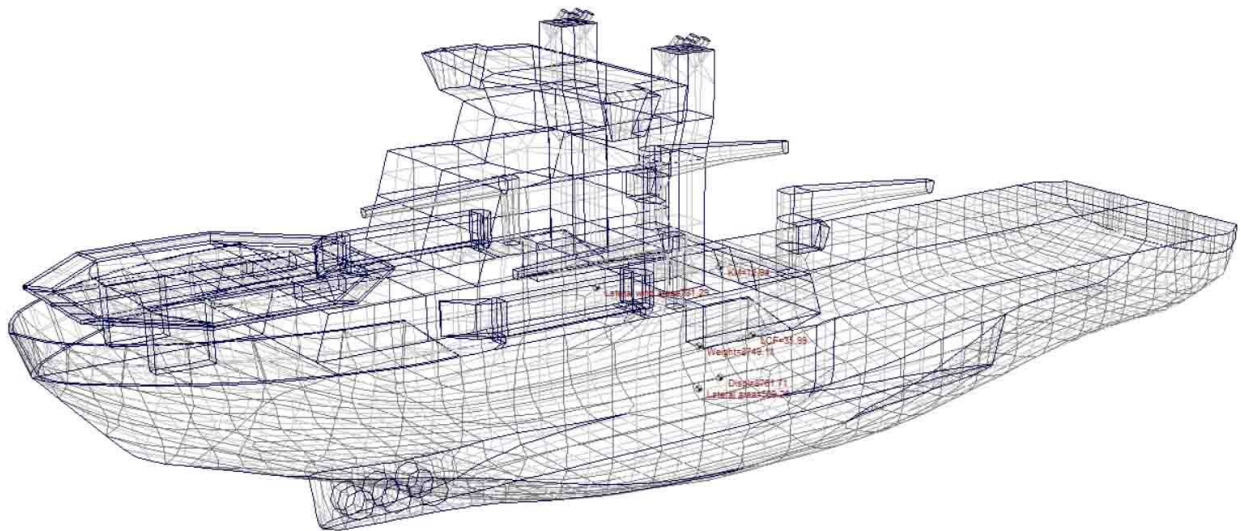


Рисунок 1 – Типовий багатоцільовий РОВТ з динамічними принципами позиціонування для виконання технологічних робіт у льодових умовах

Тільки відповідним чином технічно підготовлені та класифіковані РОВТ можуть виконувати безпечно ДП в льодових умовах. При цьому, ця умова є необхідною, але не є достатньою. Ключовим питанням оцінки безпеки при здійсненні ДП в льодових умовах пропонується прийняти питання оцінки взаємодії корпусу РОВТ і криг, що збуджують керований рух. Інфологічну модель безпечного ДП РОВТ в локально обмеженому просторі при виконанні технологічної роботи наведено на рис. 2.

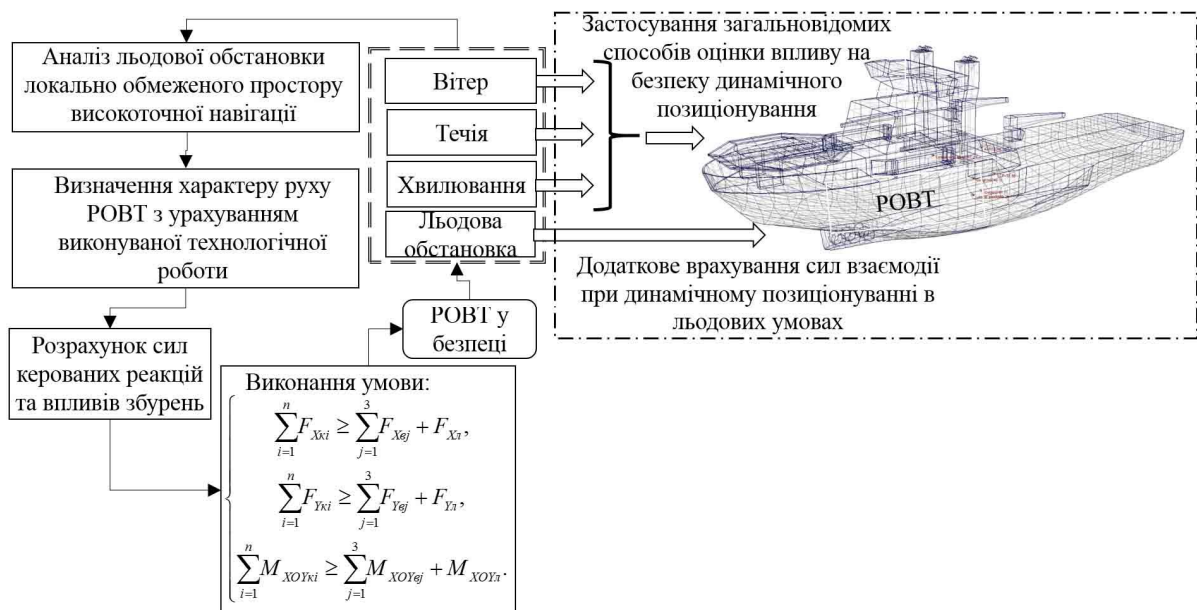


Рисунок 2 – Інфологічна модель безпечного динамічного позиціонування з додатковим урахуванням льодової обстановки локально обмеженого простору виконання технологічної роботи

Для визначення сил льодового впливу необхідно провести всебічний аналіз льодової обстановки локально обмеженого простору здійснення високоточної навігації. Локально обмеженим простором можна прийняти для цілей даного дослідження 500-метрову зону, в якій проходить технологічна робота.

Структура льоду визначається умовами виникнення та формування кристалів, які спочатку утворюються в тонкому поверхневому шарі води локально обмеженого простору. В процесі росту лід набуває неоднорідної блокової будови. За межами блоків

кристалів концентруються сторонні домішки і соляний розчин (цей процес типовий для морського льоду).

Характер руху РОВТ в льодовому полі визначається технологічною роботою, що виконує РОВТ в акваторії навігації. Технологічна робота, що вимагає від РОВТ просування у суцільних льодових полях, викликає взаємодію корпусу РОВТ з кригою, особливістю якої є руйнування крижаного шару носом РОВТ. Серед складових сил опору при русі РОВТ, який є об'єктом керування СДП, в суцільних льодових полях основне значення належить силам, що витрачаються на руйнування крижаного по шару, розсовування і занурення крижин, їх ущільнення, тертя об корпус. Найбільш істотний вплив на зміну стану керованого РОВТ суцільних льодових полях мають товщина і фізичні характеристики крижаного покриву.

Технологічна робота, що вимагає від РОВТ утримання позиції в льодових умовах, не передбачає під час ДП руху скрізь кригу. Проте в умовах льодоходу льодові навантаження матимуть місце. При цьому, якщо дозволяє характер технологічної роботи, курс РОВТ змінюється таким чином, щоб зустрічати криги носовою частиною. При цьому, льодові поля складаються з дрібнобитих криг, які дрейфують з певною швидкістю, збурюючи керований рух. У цих умовах найбільш характерним моментом є розсовування крижин носовим краєм РОВТ. Розламування крижин корпусом практично відсутнє. Сила взаємодії криг з корпусом РОВТ в дрібнобитих крижаних полях локально обмеженого простору зумовлена в основному втратами кінетичної енергії при ударах, а також роботою, витраченою на розсовування і занурення крижин, подолання сил тертя крижин об корпус РОВТ. Найбільш істотний вплив на ДП РОВТ мають розміри (довжина і товщина) крижин, їх згуртованість і стиснення.

ДП в уламках полів і крупнобитих кригах характеризується процесами, притаманними ДП як в суцільних льодових полях, так і в дрібнобитих крижаних полях. Ці фізичні нелінійні процеси відрізняються найбільшою складністю і мають нестационарний характер.

Потенційну небезпеку на просторово-часовому проміжку ДП РОВТ при виконанні технологічної роботи в льодових умовах представляє собою виникнення додаткових «льодових» сил, що збурюють РОВТ.

В класичній постановці питання для досягнення безпеки високоточної навігації РОВТ під час ДП під дією факторів навколишнього середовища необхідне виконання наступних умов:

$$\begin{cases} F_k \geq F_e, \\ M_k \geq M_e, \end{cases} \quad (1)$$

де F_k – сила керованої реакції; M_k – момент керованої реакції; F_e – сила нелінійного впливу, що збурює РОВТ; M_e – момент нелінійного впливу, що збурює РОВТ.

Практичне гарантування рівня безпеки РОВТ, що здійснює ДП у локально обмеженому просторі виконання технологічної роботи, зводиться до того, що при визначених зовнішніх впливах і чинниках навколишнього середовища навантаження на рушійний комплекс не будуть перевищувати сили засобів активного керування.

При чому на теперішній час при будівництві діаграм, які є засобом оцінки ОСДП можливості безпечного здійснення ДП РОВТ, враховуються тільки сили та моменти, що створюються наступними чинниками навколишнього середовища: течія, вітер та хвилювання [9]. Умову (1) можна переписати наступним чином, враховуючи розкладання сил на осі класичної зв'язаної системи координат РОВТ.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n F_{Xki} \geq \sum_{j=1}^3 F_{Xej}, \\ \sum_{i=1}^n F_{Yki} \geq \sum_{j=1}^3 F_{Yej}, \\ \sum_{i=1}^n M_{XOYki} \geq \sum_{j=1}^3 M_{XOYej}, \end{array} \right. \quad (2)$$

де F_{Xk} , F_{Yk} , F_{Xe} , F_{Ye} – проекції сил керованих реакцій та зовнішніх сил на відповідні осі зв'язаної системи координат; M_{XOYk} , M_{XOYe} – моменти керованих реакцій та збурень в площині XOY; n – кількість рушіїв РОВТ.

Не прийняття до уваги сил льодового збурення може спричинити до невиконання умови (1) та втрати надійного контролю ДП. Тому при оцінці ДП РОВТ необхідно додатково враховувати сили льодової взаємодії, і система (2) матиме фінальний вираз, що відповідає повномірній оцінці можливості безпечного ДП та здійснення технологічної роботи.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n F_{Xki} \geq \sum_{j=1}^3 F_{Xej} + F_{Xl}, \\ \sum_{i=1}^n F_{Yki} \geq \sum_{j=1}^3 F_{Yej} + F_{Yl}, \\ \sum_{i=1}^n M_{XOYki} \geq \sum_{j=1}^3 M_{XOYej} + M_{XOYl}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Виконання умови (3) відповідає безпечному стану проведення ДП в конкретних умовах визначеного локально обмеженого простору. Якщо умову (3) не виконано, то РОВТ перебуває в стані потенційної небезпеки. Втрата надійного контролю ДП при наявності навігаційних небезпек може спричинити аварію. Тому ОСДП має, при наявності такої можливості, провести коректування положення РОВТ відносно головного вектора впливу зовнішніх збурень. У випадку типового РОВТ, який зображено на рис. 1, оптимальним буде таке положення РОВТ, коли головний вектор збурень діє на носову частину. Якщо і при оптимальному положенні умову (3) виконати неможливо, то слід не починати ДП (або негайно зупинити розпочате ДП і покинути локально обмежений простір виконання технологічної роботи). Слід чекати, коли умови локально обмеженого простору зміняться на кращі і зможуть дати можливість безпечно виконувати ДП.

Висновки і перспектива подальших наукових досліджень. Льодова обстановка, яка є актуальною для зимових умов басейнів Чорного та Азовського морів, є одним із загрозливих факторів навколишнього середовища при здійсненні ДП РОВТ і має бути врахована. Згідно з розробленою інфологічною моделлю, навігаційна безпека ДП відповідно класифікованого РОВТ для здійснення технологічної роботи в льодових умовах досягається за рахунок підвищення рівня знань ОСДП стосовно співвідношення сил і моментів збурень, сил і моментів керованих реакцій компонентів рушійного комплексу РОВТ.

Знання фізико-механічних властивостей криг локально обмеженого простору, в якому відбувається процес ДП, має важливе значення при вирішенні завдань, пов'язаних із вивченням сил та моменту зовнішніх збурень. Тому виникає необхідність у подальших дослідженнях і аналізі льодових умов у акваторіях Чорного та Азовського морів.

Інтерес подальших наукових досліджень також полягає у вивченні впливу характеристик корпусу та рушійного комплексу РОВТ на процеси формування керуючих впливів в льодових умовах, що може знайти практичне застосування у створенні перспективних високоточних інтелектуальних програмно-апаратних комплексів підтримки прийняття рішень ОСДП, які можуть бути інтегровані у бортовий багатофункціональний комплекс навігаційного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IMCA M 182. International Guidelines for the Safe Operation of Dynamically Positioned Offshore Supply Vessels. – London : IMCA, 2006. – 56 p.
2. Доронин Ю. П. Региональная океанология / Ю. П. Доронин. – Л. : Гидрометеоздат, 1986. – 303 с.
3. Справочник по климату Черного моря / ГУ ГМС при Совете министров СССР, Севастопольское отделение Государственного океанографического института. Под ред. А. И. Соркиной. – М. : Гидрометеоздат, 1974. – 406 с.
4. Богородский В. В. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии : монография / В. В. Богородский, В. П. Гаврило. – Л. : Гидрометеоздат, 1980. – 384 с.
5. Hobbs P.V. Ice Physics / P.V. Hobbs. – Clarendon Press, Oxford, 1974. – 394 p.
6. Calabrese J. S. Frictional Characteristics of Materials Sliding Against Ice / J. S. Calabrese, R. Buxton, G. March // Journ. of the American Society of Lubricating Engineers. – 1980. – Vol. 36. – № 5. – P. 283–289.
7. IMO MSC Circular 645. Guidelines for vessels with dynamic positioning systems. – IMO, London, 1994. – 22 p.
8. Germanischer Lloyd. Rules for Classification and Construction. I Seagoing Ships. – Hamburg, Germanischer Lloyd SE, 2013. – 26 p.
9. IMCA M 140 Rev. 1. Specification for DP Capability Plots. – IMCA, London, 2000. – 17 p.

REFERENCES

1. IMCA M 182. International Guidelines for the Safe Operation of Dynamically Positioned Offshore Supply Vessels. – London : IMCA, 2006. – 56 p.
2. Doronin Y. P. Regional oceanology / Yu. P. Doronin. – L. : Gidrometeoizdat, 1986. – 303 p.
3. Handbook on the climate of the Black Sea / GU HMS under the Council of Ministers of the USSR, Sevastopol Branch of the State Oceanographic Institute. Ed. A. I. Sorkina. – Moscow : Gidrometeoizdat, 1974. – 406 p.
4. Bogorodsky V. V. Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology : monograph / V. V. Bogorodsky, V. P. Gavrilov. – L. : Gidrometeoizdat, 1980. – 384 p.
5. Hobbs P. V. Ice Physics / P. V. Hobbs. – Clarendon Press, Oxford, 1974. – 394 p.
6. Calabrese J. S. Frictional Characteristics of Materials Sliding Against Ice / J. S. Calabrese, R. Buxton, G. March // Journ. of the American Society of Lubricating Engineers. – 1980. – Vol. 36. – № 5. – P. 283–289.
7. IMO MSC Circular 645. Guidelines for vessels with dynamic positioning systems. – IMO, London, 1994. – 22 p.
8. Germanischer Lloyd. Rules for Classification and Construction. I Seagoing Ships. – Hamburg, Germanischer Lloyd SE, 2013. – 26 p.
9. IMCA M 140 Rev. 1. Specification for DP Capability Plots. – IMCA, London, 2000. – 17 p.

Габрук Р. А. БЕЗОПАСНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНО ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

В работе рассмотрены вопросы навигационной безопасности осуществления динамического позиционирования подвижного объекта водного транспорта в условиях возмущений факторов окружающей среды с учетом ледовой обстановки локально ограниченного пространства выполнения технологической работы. Доказана актуальность вопросов навигационной безопасности в ледовых условиях Черного и Азовского морей при разработке энергетических ресурсов шельфа. Разработана инфологическая модель обеспечения безопасности, в фокусе которой является сформированная система алгебраических неравенств, которая отражает соотношение между силами и моментами возмущений, силами и моментами управляемых реакций движительного комплекса. Практическое обеспечение безопасности высокоточной навигации достигается за счет повышения уровня знаний операторов систем динамического позиционирования в режиме реального времени и в прогнозном режиме, что имеет перспективу создания программно-аппаратных комплексов поддержки принятия решений, которые могут быть интегрированы с бортовым многофункциональным комплексом навигационного оборудования. Определены перспективные направления дальнейших научных исследований.

Ключевые слова: система динамического позиционирования, безопасность мореплавания, судовождение, подвижный объект водного транспорта, ледовые условия.

Gabruk R. A. SAFETY OF DYNAMIC POSITIONING IN ICE CONDITIONS OF LOCALLY CONFINED AREA

The paper is dedicated to the safety of navigation during dynamic positioning on mobile water transport object in disturbing conditions of environmental factors in view of ice conditions of locally confined area of technological work performance. The importance was proved for safety of navigational in ice conditions of the Black and Azov seas during energy resources production on continental shelf resources. Infological model was developed, which focuses on formed system of algebraic inequalities, reflecting the ratio between disturbing forces and moments, and forces and moments of controlled reactions by propulsion complex. Practical safety of high precision navigation is achieved by improving knowledge level of the dynamic positioning system operator in real time and the prediction mode that has the prospect of further development decision-making support hardware and software, which can be integrated with the on-board multi-function complex of navigation equipment. Perspective directions for further research were defined.

Keywords: dynamic positioning, safety of navigation, navigation, mobile water transport object, ice conditions.

© Габрук Р.А.

Статтю прийнято
до редакції 02.06.17

УДК 658.11:303.732(62-50)

СТРУКТУРА ЕДИНОЇ СИСТЕМИ ПОИСКА И СПАСАНИЯ НА МОРЕ С УПРАВЛЕНИЕМ

Годованюк С. П., старший преподаватель кафедры судовождения и безопасности жизнедеятельности на море Херсонской государственной морской академии, e-mail: godovaniuk1969@mail.ru;

Селиванов С. Е., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой судовождения и безопасности жизнедеятельности на море Херсонской государственной морской академии, e-mail: selivanstas@mail.ru.

С целью выполнения обязательств по международным договорам, стороной которых является Украина, по осуществлению операций по поиску и спасанию человеческой жизни, создана единая система поиска и спасания на море. Единая система поиска и спасания на море – управляющая система совместно с системой связи образует систему управления. Управление является необходимым условием нормального функционирования всякой системы. Дано понятие иерархического принципа управления. Показано, что в реальной жизни не существует только централизованной и децентрализованной систем управления и это касается национальной единой системы поиска и спасания на море в Украине. Рассмотрена обобщенная структурная схема системы с управлением. В общих чертах представлен процесс управления основными этапами. Приведены аксиомы теории управления. В структуру национальной единой системы поиска и спасания на море входит казенное предприятие «Морская поисково-спасательная служба», поэтому из мирового опыта известно, чтобы обеспечить более эффективную и продуктивную работу предприятия внедряют интегрированную систему управления (ИСУ), т.е. внедрение ИСУ – выбор самого предприятия. Кроме интегрированной системы управления, имеет место распределенная система управления, в случае когда существует большое число локальных подсистем управления, принимающих самостоятельные решения на основе знаний и механизмов логического вывода. В заключении отмечено, что в зависимости от степени участия человека в процессе управления применяют различные виды систем управления: системы ручного управления, САУ, АСУ.

Ключевые слова: система, управление, иерархия, централизованная система, децентрализованная система, аксиома, интегрированная система, распределенная система.

Введение. С целью выполнения обязательств по международным договорам, стороной которых является Украина, по осуществлению операций по поиску и спасанию человеческой жизни 24 февраля 2016 г. Кабинет Министров Украины Постановлением № 158 принял решение «О восстановлении единой системы поиска и спасания на море» [1], а 25 марта 2016 г. Министерство инфраструктуры Украины издало указ «О выполнении мероприятий по восстановлению единой системы поиска и спасания на море» [2].

Внутренняя форма системы – это структура, образно говоря, ее «строение». Ее нельзя, как это нередко делают, сводить лишь к составу системы, набору компонентов.

Структура единой системы поиска и спасания на море объединяет органы управления, органы исполнительной власти, для согласования действий – координационный комитет по поиску и спасанию на море, для организации – казенное предприятие «Морская поисково-спасательная служба», исполнителем – территориальный государственный морской спасательно-координационный центр и его функциональные подцентры.

Единая система поиска и спасания на море – управляющая система совместно с системой связи образует систему управления.

Управление является необходимым условием нормального функционирования всякой системы.

Специфика такой системы определяется разнообразностью взаимосвязей, множеством частных целей, иерархичностью, многоаспектностью и рядом других свойств.

Иерархия (от греч. *hieros* – священный, *arche* – власть) – это расположение частей и элементов целого в порядке от низшего к высшему [3].

Иерархический принцип управления – это принцип построения многоступенчатых систем управления, при котором функции управления распределяются между соподчиненными частями системы [4].

Система управления называется централизованной, если все вопросы решаются на высшем уровне управления. И наоборот, система управления называется децентрализованной, если значительная часть проблем и вопросов решается на среднем и низших уровнях управления [5].

В реальной жизни не существует только централизованной и децентрализованной система управления. Это касается и национальной единой системы поиска и спасания на море в Украине. Любой процесс в работе системы может осуществляться в нужном направлении только при наличии управляющих воздействий со стороны органов управления, что является **актуальной задачей**.

Управление есть процесс [6], а система управления – механизм, который обеспечивает этот процесс [7]. Всякое управление предполагает наличие **цели**, т.е. модели желаемых изменений.

Изложение основного материала. В процессе системы с управлением участвуют три подсистемы: управляющая система, объект управления и соединяющие их каналы связи (система связи) [5].

Управление всегда протекает в определенной материальной среде. От органа управления к объекту управления проходит канал прямой связи для передачи управляющих воздействий. От объекта управления к органу управления проходит канал обратной связи для передачи сведений о состоянии объекта управления, среды и других факторов обстановки.

Цель действий достигается функционированием объекта управления.

Обобщенная структурная схема системы с управлением может быть представлена на рис. 1.

На рис.1 показано воздействие окружающей среды (различного рода помехи) и показатели n и m характеризующие качество и эффективность функционирования подсистемы B .

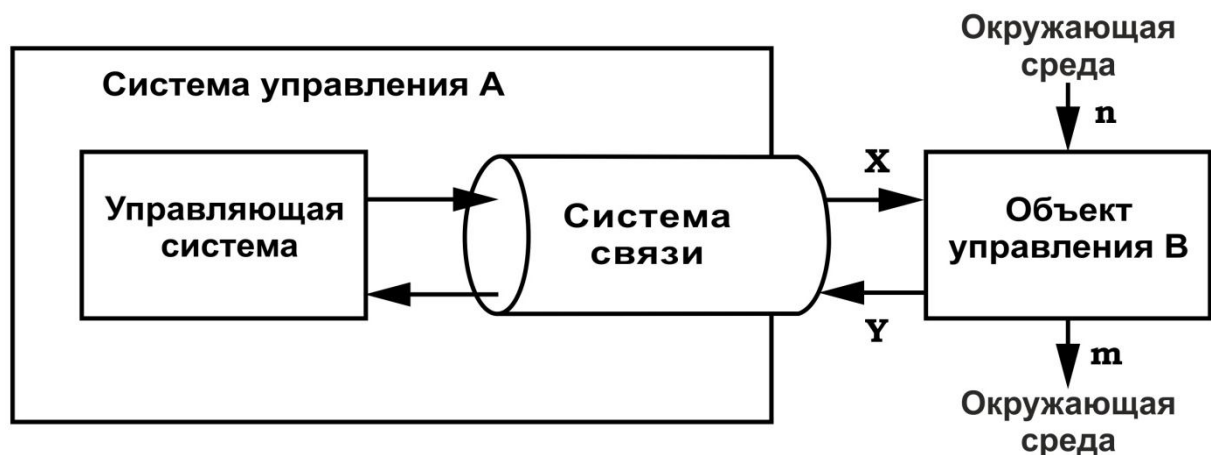


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема системы с управлением:

X – канал прямой связи, по которому передается входная информация; Y – канал обратной связи, по которому передается информация о состоянии подсистемы B .

Рассмотрим основные положения по управлению систем (рис. 1), опираясь на принятую терминологию и базовые понятия.

Система, на которую оказываются целенаправленные воздействия, называется управляемой или объектом управления. Носителем цели управления является субъект управления.

Объект управления – изменение состояния объекта в соответствии с заданным законом управления. Такое изменение происходит в результате внешних факторов, например, вследствие управляющих или возмущающих воздействий. Объектом управления может быть любая динамическая система или её модель. Объект системы управления может состоять из других объектов, которые могут иметь постоянную структуру взаимосвязей.

Часть системы управления, осуществляющая управление объектом по заданным целям, критериям и ограничениям, является управляющей системой.

Система передачи информации осуществляется системой связи между управляющей системой и объектом управления.

Отметим, что управляющая система совместно с системой связи образует систему управления.

Системы с управлением (единая система поиска и спасания на море), или целенаправленные называются кибернетическими.

Кибернетика – наука об общих законах управления.

С позиции кибернетики системам управления различной природы – техническим, организационным, экономическим, биологическим, социальным – присущи общие закономерности.

Все эти системы управления объединяет, в принципе, одинаковая структура: математическое описание процессов, протекающих в системах управления различной природы, оказывается подобным.

В общих чертах процесс управления можно представить следующими основными этапами:

- сбор и анализ информации, необходимой для управления;
- принятие решения о целесообразном управляющем воздействии;
- реализация решения – выработка и применение к объекту управления управляющих воздействий;
- контроль над состоянием и реакцией объекта управления (по существу, этот этап есть циклический переход к первому этапу сбора и анализа информации).

На основании проведенного исследования обобщенной схемы системы управления можно сформулировать несколько условий, которые в литературе известны как аксиомы теории управления [5].

Выполнение этих условий предполагается обязательным при создании системы управления.

Аксиома 1. Наличие наблюдаемости объекта управления, т.е. возможность получения информации о состоянии объекта управления, его реакциях на внешнюю среду и управляющих воздействиях. Без этой информации управление невозможно или неэффективно.

Аксиома 2. Наличие управляемости объекта управления, т.е. способность объекта управления переходить в требуемое состояние под воздействием управляющих воздействий. Если состояние объекта управления не меняется, то понятие управления теряет смысл.

Аксиома 3. Наличие цели управления. Под целью управления понимают набор значений количественных или качественных характеристик, определяющих требуемое состояние объекта управления. Если цель неизвестна, управление не имеет смысла, а изменение состояний превращается в бесцельное блуждание.

Аксиома 4. Свобода выбора – возможность выбора управляющих воздействий (решений) из некоторого множества допустимых альтернатив. Чем меньше это множество, тем менее эффективно управление, так как в условиях ограничений оптимальные решения часто остаются за пределами области адекватности. Если имеется единственная альтернатива, то управление не требуется. Если решения не влияют на изменение состояния объекта управления, то управления не существует. Необходимый

объем множества управляющих воздействий зависит от самой цели управления и сложности объекта.

Известен фундаментальный закон кибернетики, который, по определению Уильяма Эшби, относится к системам управления и формулируется так: «Разнообразие управляющей системы должно быть не меньше, чем разнообразие объекта управления» [8]. Это означает, что для управления большой (сложной) системой, управляющая система должна иметь значительное собственное разнообразие. В идеале на каждое возможное состояние объекта управления в системе должно быть предусмотрено как минимум одно воздействие, приводящее объект управления в желаемое состояние.

Аксиома 5. Наличие критерия эффективности управления. Обобщенным критерием эффективности управления считается степень достижения цели функционирования системы. Кроме степени достижения цели, качество управления можно оценивать по частным критериям: степени соответствия управляющих воздействий требуемым состояниям объекта управления, качеству принимаемых решений, точности управления.

Аксиома 6. Наличие ресурсов управления, т.е. возможность реализовать выбранные управляющие воздействия при имеющихся ресурсах и заданных ограничениях. Отсутствие ресурсов равносильно отсутствию свободы выбора.

Управление без ресурсов невозможно. В структуру национальной единой системы поиска и спасания на море входит казенное предприятие «Морская поисково-спасательная служба», поэтому из мирового опыта известно, чтобы обеспечить более эффективную и продуктивную работу предприятия внедряют интегрированную систему управления (ИСУ), т.е. внедрение ИСУ – выбор самого предприятия.

Интегрированная система управления – это система управления, в которой все компоненты (персонал, оборудование, ресурсы и процессы) объединены воедино, в одну систему, дающую возможность обеспечить более эффективную и продуктивную работу предприятия.

По нашему опыту казенное предприятие «Морская поисково-спасательная служба» всегда является одним, целостным и не нуждается в специальной «интеграции». Каждый раз, когда руководитель предприятия принимает определенное решение, он должен учитывать его влияние на достижение всех целей организации.

Кроме интегрированной системы управления, имеет место распределенная система управления, в случае, когда существует большое число локальных подсистем управления, принимающих самостоятельные решения на основе знаний и механизмов логического вывода. Данные подсистемы образуют некоторое сообщество, в котором они объединяются общими целями и используют общее множество ограниченных ресурсов для достижения этих целей.

В общем случае, в распределенной системе управления производством по частоте формирования и выдачи управляющих воздействий выделяют следующие уровни управления: оперативно-организационный, оперативно-диспетчерский и оперативно-технологический.

Как известно, на оперативно-организационном уровне осуществляется планирование и учет хода производства, управление технологической подготовкой производства; на оперативно-диспетчерском уровне – координация работы модулей, входящих в состав системы, а также реализуется управление материальными потоками. На оперативно-технологическом уровне осуществляется программное управление отдельными единицами производственного оборудования, их исполнительными механизмами, средствами автоматизации и синхронизации их работы. При этом состав уровней управления и их функциональное содержание определяются назначением конкретной распределенной системы. Три данных уровня управления качественно отличаются как по объемам обрабатываемой информации, так и по требуемой скорости получения управляющих воздействий.

Распределенные системы также, как и их интегрированные аналоги, имеют свои достоинства и недостатки, так что вопрос, на какой из систем остановить свой выбор, решается, исходя из индивидуальных особенностей объекта.

В заключении отметим, что в зависимости от степени участия человека в процессе управления различают следующие виды систем управления:

1. Системы ручного управления.

В этих системах человек выполняет все функции управления. При этом не исключается применение механизмов для реализации управляющих воздействий, каких либо инструментов для сбора информации (например, измерения параметров объекта управления).

2. Системы автоматического управления (САУ). В этих системах управляющая часть – управляющая система не содержит в себе человека, выработка управляющих воздействия выполняется автоматически на основе запрограммированных алгоритмов поведения системы. Человек присутствует на этапе создания алгоритмов и программ, которые и отражают в себе цель управления.

Перспективы развития САУ связаны с использованием в них методов искусственного интеллекта, позволяющих осуществлять автоматическое управление в сложных, изменяющихся условиях, при недостатке или неточности имеющейся информации, подстраиваясь под особенности окружающей среды и объекта управления.

3. Автоматизированные системы управления (АСУ). В АСУ человек остается главным действующим лицом процесса управления. Можно выделить два основных канала автоматизации, в которых ряд функций от человека передается ЭВМ:

- информационный канал (автоматизация сбора, представления, анализа информации);
- управляющий канал (автоматизация генерации, передачи и применения управляющих воздействий).

Широкое применение автоматизированные системы управления находят в управлении организационно-экономическими системами (предприятиями), где процессы управления отличаются значительной сложностью и связаны с большими объемами используемой информации.

Такие АСУ сами отличаются сложностью структуры и наличием большого числа подсистем, выполняющих различные функции.

К числу подсистем комплексной АСУ предприятием относятся системы поддержки принятия решений (СППР). Эти системы предназначены для автоматизации наименее формализуемого и наиболее интеллектуального этапа процесса управления, связанного с принятием решений о необходимых воздействиях на объект управления. Функционирование СППР в зависимости от объема выполняемых функций опирается на методы аналитической и интеллектуальной обработки данных (факторный, корреляционный и другие виды анализа, технологии OLAP, Data Mining), методы экспертных систем, ситуационного управления и др.

Выводы.

1. Необходимым условием нормального функционирования системы является управление.

2. Без знания основных положений по управлению системой невозможно совершенствовать систему.

3. Процесс управления необходимо представлять в виде принятых основных этапах.

4. При создании системы управления обязательным предполагается учет известных аксиом.

5. В зависимости от степени участия человека в процессе управления следует применять различные виды систем управления (ручную, автоматическую или автоматизированную систему управления).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Про відновлення єдиної системи пошуку та рятування на морі : від 24 лютого 2016 р. / Постанова № 158. Кабінет Міністрів України. – К. : 2016.
2. Про виконання заходів з відновлення єдиної системи пошуку та рятування на морі : від 25 березня 2016 р. / Наказ № 119. Міністерство інфраструктури України. – К. : 2016.
3. Философия: Энциклопедический словарь / Под ред. А. А. Ивина. – М. : Гардарики, 2004. – 1072 с.
4. Theory of hierarchical, multilevel, systems / [by] M. D. Mesarovic, D. Macko, and y. Takahara. III. New York: Academic Press, 1970. – 294 p.
5. Анфилатов В. С. Системный анализ в управлении : учеб. пособие / В. С. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин. – М. : Финансы и статистика. 2002. – 368 с.
6. Мескон Майкл. Основы менеджмента / Майкл Альберт, Франклин Хедоури. Пер. Л. И. Евенко. – М. : Дело, 1997. – 704 с.
7. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – М. : 2005. – 584 с.
8. Эшби У. Введение в кибернетику / У. Эшби. пер. с англ. – М. : 2009. – 432 с.

REFERENCES

1. About restoration of uniform system of search and rescuing on the sea: from February, 24th, 2016 / the Decision № 158. The Cabinet of Ukraine. – K. : 2016.
2. About performance of actions for restoration of uniform system of search and rescuing on the sea: from March, 25th, 2016 / the Order № 119. The ministry of an infrastructure of Ukraine. – K. : 2016.
3. Philosophy: the Encyclopaedic dictionary / Under the editorship of A. A. Ivina. – M. Gardariki, 2004. – 1072 p.
4. Theory of hierarchical, multilevel, systems / [by] M.D. Mesarovic, D. Macko, and y. Takahara. III. New York; Academic Press, 1970. 294 p.
5. Anfilatov B. S. Analysis of Systems in the management : of Studies. manual / of B. S. Anfilatov, A. A. Emelinov, A. A. Cucushkin. – M. : Finances and statistics, 2002. – 368 p.
6. Meskon Michael, Management bases / Michael Albert, Franklin Hedouri. lane L. I. Evenko. – M., 1997. – 704 p.
7. Novikov D. A. The management theory organizational systems / D. A. Novikov. – M.: 2005. – 584 p.
8. Ashby W. R. An introduction to cybernetics / W. R. Ashby eng of – M., 2009. – 432 p.

Годованюк С. П., Селіванов С. Є. СТРУКТУРА ЄДИНОЇ СИСТЕМИ ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ НА МОРІ З КЕРУВАННЯМ.

З метою виконання зобов'язань по міжнародних договорах, стороною яких є Україна, по здійсненню операцій по пошукові й рятуванню людського життя, створена єдина система пошуку й рятування на морі. Єдина система пошуку й рятування на морі – керуюча система разом із системою зв'язку утворює систему керування. Керування є необхідною умовою нормального функціонування будь-якої системи. Дане поняття ієрархічного принципу керування. Показано, що в реальному житті не існує тільки централізованої й децентралізованої систем керування, це стосується національної єдиної системи пошуку й рятування на морі в Україні. Розглянута узагальнена структурна схема системи з керуванням. Загалом, процес керування представлено основними етапами. Наведено аксіоми теорії керування. У структуру національної єдиної системи пошуку й рятування на морі входить казенне підприємство «Морська пошуково-рятувальна служба», тому зі світового досвіду відомо, щоб забезпечити більш ефективну й продуктивну роботу підприємства впроваджують інтегровану систему керування (ІСУ), тобто впровадження ІСУ – вибір самого підприємства. Крім інтегрованої системи керування, має місце розподілена система керування, у випадку коли існує велика кількість локальних підсистем керування, що

приймають самостійні рішення на основі знань і механізмів логічного висновку. У висновку відзначено, що залежно від ступеня участі людини в процесі керування застосовують різні види систем керування: системи ручного керування, САУ, АСУ.

Ключові слова: система, керування, ієрархія, централізована система, децентралізована система, аксіома, інтегрована система, розподілена система

Godovanjuk S. P., Selivanov S. E. THE STRUCTURE OF THE UNIFORM SYSTEMS OF SEARCH AND RESCUE ON THE SEA WITH MANAGEMENT

The uniform system of search and rescue on the sea is created for the purpose of performance of obligations under the international contracts the party of which Ukraine is, on realisation of operations on search and rescue of a human life. Uniform system of search and rescue on the sea – the managing system together with a communication system form a control system. Management is a necessary condition for normal functioning of any system. The concept is of hierarchical principle of management. It is shown, that in a real life there do not exist only the centralised and decentralised control systems and it concerns the national uniform systems of search and rescue on the sea in Ukraine. The generalised structural scheme of the system with management is also described. In general managerial process of the basic stages is presented. Axioms of the theory of management are given. The state enterprise «Sea search and rescue service» is included in the structure of national unified system of search and rescue on the sea, therefore it is known from the world experience that in order to provide more effective and productive work of the enterprise, the integrated control system (ICS) is implemented, i.e. the implementation of ICS is a choice of enterprises. Except the integrated control system the distributed management system takes place in case when there is a big number of local subsystems of the management that accept independent decisions on the basis of knowledge and mechanisms of a logic conclusion. In the conclusion it is stated that depending on the degree of participation of the person in managerial process various kinds of control systems are applied: hand control systems, SAU, ASU.

Keywords: system, management, the hierarchy, the centralised system, decentralised system, the axiom, the integrated system, the distributed system.

© Годованюк С. П., Селіванов С. Є.

Статтю прийнято
до редакції 05.06.17

УДК 629.5.064-8438

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭУ СУДНА ТИПА «ИНЖЕНЕР ЕРМОШКИН» НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЗКИ

Ермошкин Н. Г., к.т.н., доцент, профессор кафедры корабельной энергетики и электроэнергетических систем Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: seu@ma.odessa.ua

Игнатенко А. А., и.о. начальника кафедры корабельной энергетики и электроэнергетических систем Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: seu@ma.odessa.ua

Лукинова В. В., младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: victoria.lukinova@gmail.com

Опыт эксплуатации и теплотехнические исследования наметили дальнейшие пути проектирования такого типа судовых энергетических установок и их грамотной эксплуатации как на флоте, так и в ВМС.

Ключевые слова: газотурбинная установка, статические характеристики.

Введение. Особенностью ЭУ является комбинированная газопаротурбинная установка. В настоящее время утилизация теплоты отработавших газов в пароводяном контуре является одним из самых эффективных способов повышения экономичности газотурбинных двигателей (ГТД). Комбинированные газопаротурбинные установки (ГПТУ) этого типа, созданные в Украине на производственном объединении «Зоря»-«Машпроект», находят с каждым годом все более широкое применение в различных областях народного хозяйства, таких как ТЭС. В нашей стране, на Николаевском судостроительном заводе и на Николаевском объединении «Зоря»-«Машпроект», впервые в мировой практике судостроения серия судов с горизонтальной грузообработкой типа «Инженер Ермошкин» оснащена ГПТУ, в которой ГТД и паровая турбина (ПТ) теплоутилизационного контура (ТУК) передают полезную мощность на винт через общий редуктор. Аналогичные ГПТУ в дальнейшем устанавливались на боевые корабли ВМФ. Принципиальная схема такой энергетической установки показана на рис. 1.

Основное содержание. Одним из важных показателей работы энергетической установки (ЭУ) являются статические характеристики, которые определяют закономерности изменения параметров на различных установившихся режимах. Их исследованию, методам определения уделяется большое внимание на различных стадиях проектирования, опытно-доводочных работах, эксплуатации.

В качестве метода исследования статических характеристик ГПТУ судна типа «Инженер Ермошкин» был выбран путь построения математической модели ЭУ с проверкой ее адекватности по данным отдельных натурных испытаний и определение особенностей статических характеристик с помощью постановки необходимых численных экспериментов. Такую математическую модель можно записать в векторной форме как:

$$\bar{P} = f(\bar{R}, \bar{G}, \bar{C}, \bar{B}), \quad (1)$$

где \bar{P} – вектор параметров ГПТУ на установившихся режимах (статические характеристики); \bar{R} – вектор параметров, однозначно определяющих режимы работы ГПТУ; \bar{G} – вектор необходимых для расчета геометрических характеристик проточной части; \bar{C} – вектор различных констант; \bar{B} – вектор параметров, определяющих характеристики потребителей полезной мощности.

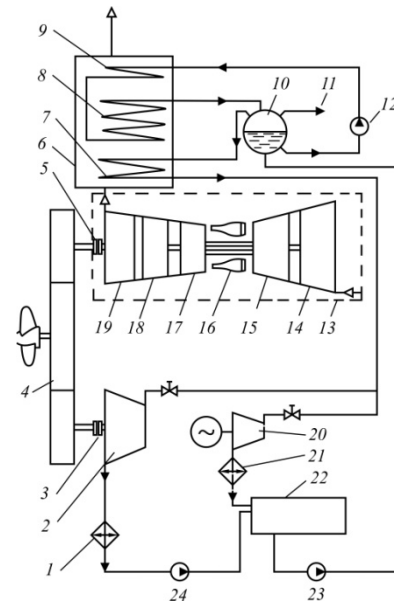


Рисунок 1 – Принципиальная схема ГТУ судна с горизонтальной грузообработкой типа «Инженер Ермошкин»:

1 – конденсатор пропульсивной ПТ; 2 – ПТ; 3 – разобщительная муфта ПТ; 4 – редуктор; 5 – разобщительная муфта ГТД; 6 – утилизационный котел (УК); 7 – пароперегреватель УК; 8 – испаритель УК; 9 – экономайзер УК; 10 – сепаратор; 11 – отбор насыщенного пара; 12 – циркуляционный насос; 13 – ГТД; 14, 15 – компрессоры низкого и высокого давления соответственно; 16 – камера сгорания; 17, 18 – турбины высокого и низкого давления соответственно; 19 – свободная силовая турбина; 20 – паротурбогенератор; 21 – конденсатор паротурбогенератора; 22 – теплый ящик; 23 – питательный насос; 24 – конденсатный насос

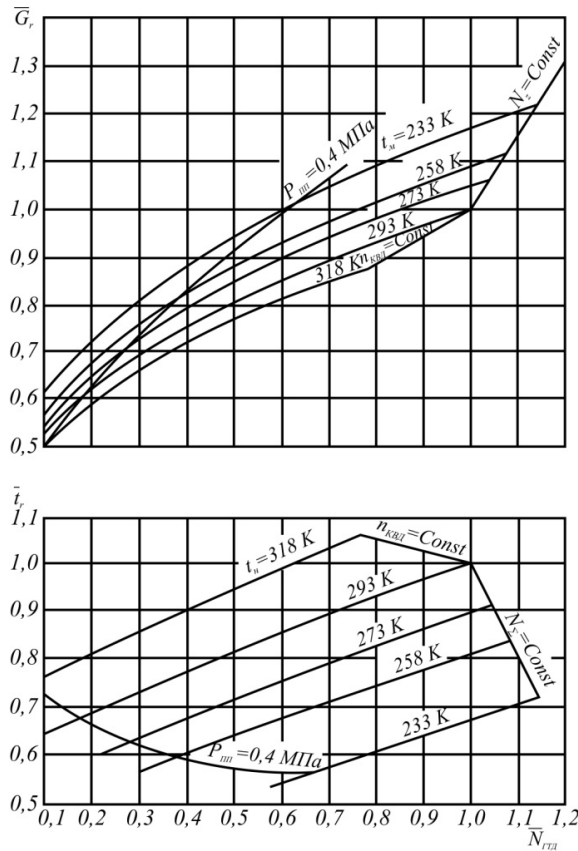


Рисунок 2 – Зависимость изменения относительного расхода газа \bar{G}_r и относительной температуры газа \bar{t}_r от относительной мощности ГТД $\bar{N}_{ГТД}$ для различных температур наружного воздуха t_n (Параметры отнесены к номинальному режиму)

Не останавливаясь на принципах построения и других особенностях математической модели, в данном случае хотелось бы основное внимание уделить некоторым практически важным результатам исследования статических характеристик.

В ГПТУ судна типа «Инженер Ермошкин» источником энергии для работы ТУК служит теплота отработавших газов ГТД, количество и потенциал которой зависят как от режима работы ГТД, так и параметров наружного воздуха. Как изображено на рис. 2, при постоянной мощности ГТД с изменением температуры наружного воздуха t_n существенно изменяются расход и температура отработавших газов, причем в обратной зависимости. Этим определяется целый ряд особенностей совместной работы ГТД и ТУК на переменных режимах.

Существенное влияние на эксплуатационные возможности ГПТУ оказывают закономерности перераспределения мощности между ГТД и ПТ при изменении режима ГТД и t_n (рис. 3).

При расчетной $t_n = 293$ К на номинальном режиме ГТД мощность ПТ составляет около 23 % от суммарной мощности между ГТД и ПТ остается примерно постоянной (рис. 3).

Если температуры наружного воздуха $t_n < 293$ К, то традиционным для ГТД является закон регулирования $N_{ГТД} = \text{const}$, что обусловлено ограничением по моменту в системе силовая турбина – редуктор винт. Однако при таком законе регулирования с уменьшением t_n падает $N_{ПТ}$ (рис. 3), суммарная мощность ГПТУ и, как следствие, скорость судна. Для обеспечения последней при $t_n < 293$ К потребовалось сохранить суммарную мощность ($N_{\Sigma} = \text{const}$), что связано с форсированием ГТД на величину, компенсирующую падение $N_{ПТ}$. Так, расчетным путем было установлено, что при граничной температуре $t_n < 233$ К, необходимо увеличить $N_{ГТД}$ на 14 % (рис. 4). Соответственно вырос крутящий момент на газотурбинной ветке редуктора, что потребовало специальной проверки на прочность соответствующих узлов. Удельный расход топлива ГПТУ увеличился на 6 % по сравнению с режимом номинальной мощности при $t_n = 293$ К.

Когда агрегат работает в диапазоне температур $t_n = 293...318$ К, статические характеристики являются функцией постоянной частоты вращения контура высокого давления ($n_{КВД} = \text{const}$). При таком законе регулирования на номинальной частоте вращения $n_{КВД}$ и граничной $t_n = 318$ К суммарная мощность агрегата уменьшилась на 18,5 % (рис. 4). В этом случае $N_{ГТД}$ снизилась на 22 %, а $N_{ПТ}$ – всего на 2 %. Незначительное падение $N_{ПТ}$ является следствием высокого потенциала тепла отработавших газов при $t_n = 318$ К (рис. 2), несмотря на падение расхода газа. Объяснить это помогает метод малых отклонений, разработанный для ГПТУ на базе нелинейной математической модели: коэффициент влияния изменения температуры газа перед утилизационным котлом δt_g на мощность ПТ $\delta N_{ПТ}$ примерно в 2 раза сильнее, чем от изменения расхода газа δG_g , т.е.:

$$\delta N_{ПТ} = 1,89\delta t_g + 0,9\delta G_g. \quad (2)$$

Удельный расход топлива увеличился в этом случае на 1,5 % по сравнению с режимом номинальной мощности при $t_n = 293$ К (рис. 4).

Существенное влияние на пропульсивную мощность ГПТУ оказывает подключение паротурбогенератора, работающего на отборе перегретого пара от утилизационного котла (рис. 1). Так, на номинальном режиме ГТД (отбор пара $\Delta G_{ПТ} = 25$ %) пропульсивная мощность ПТ уменьшается на 29 %, а N_{Σ} ГПТУ – на 7 % (рис. 3). Отбор перегретого пара сопровождается падением давления пара в утилизационном котле, увеличением паропроизводительности, незначительным ростом температуры перегретого пара. Как видно из рис. 3, при отборе перегретого пара сокращается диапазон совместной работы ГТД и ТУК на переменных режимах, что связано с падением давления пара на долевых нагрузках ГТД. В этом случае обеспечить

работоспособность паротурбогенератора можно только специальным регулированием генерации пара, в частности, отключением пропульсивной ПТ.

Эксплуатационная надежность ГПТУ с точки зрения коррозионных повреждений низкотемпературных поверхностей утилизационного котла определяется, в основном, температурой наружной стенки трубных пучков экономайзера ($t_{ст}$), которая должна быть ниже точки росы отработавших газов ГТД. Экспериментальные данные показывают, что скорость коррозии резко увеличивается при $t_{ст} < 110^\circ \text{C}$ [3].

На рис. 5 дана расчетная зависимость температуры воды на входе в экономайзер $t_{вх}^{ЭК}$, которую можно условно принять равной $t_{ст}$, от режима работы ГТД в заданном диапазоне изменения t_n . В связи с тем, что экономайзер в принятой тепловой схеме ТУК включен в систему с принудительной циркуляцией, $t_{вх}^{ЭК}$ определяется из условия теплового баланса в сепараторе:

$$t_{вх}^{ЭК} = t' - \frac{t' - t_{пв}}{K_{ц}}, \quad (3)$$

где t' – температура насыщения; $t_{пв}$ – температура питательной воды; $K_{ц}$ – кратность циркуляции.

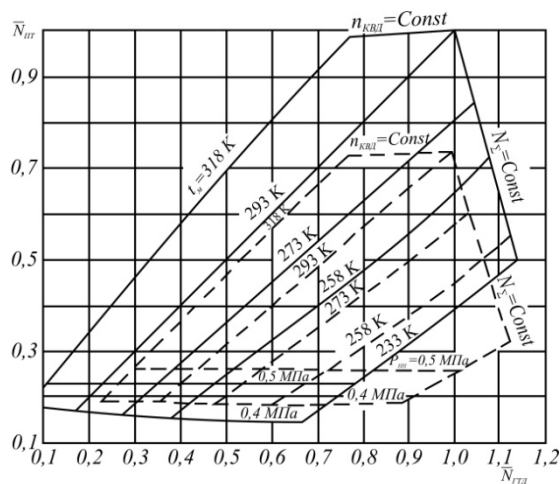


Рисунок 3 – Зависимость относительной мощности паровой турбины $\bar{N}_{ПТ}$ от изменения относительной мощности ГТД $\bar{N}_{ГТД}$ для различных t_n

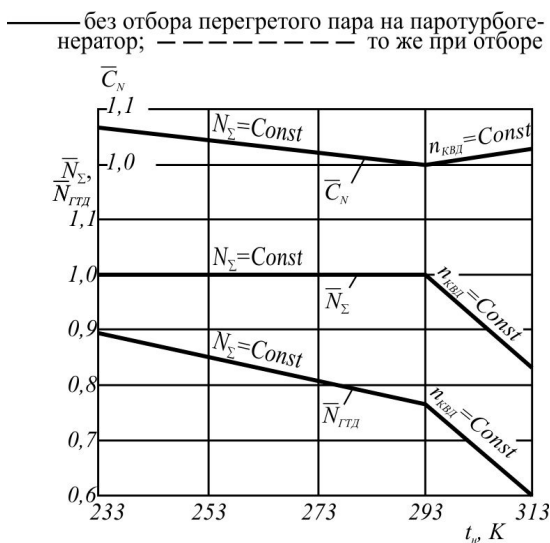


Рисунок 4 – Зависимость относительной суммарной мощности ГПТУ \bar{N}_Σ , относительной мощности ГТД $\bar{N}_{ГТД}$, относительного удельного расхода топлива \bar{G}_N для номинального режима от t_n

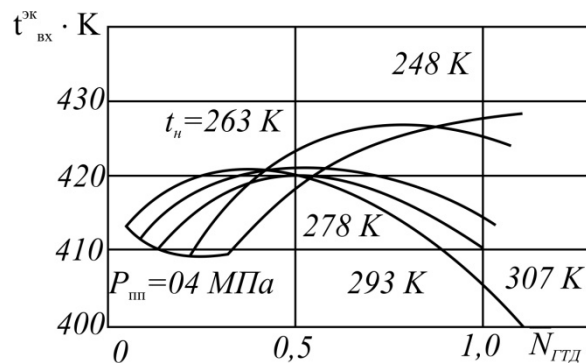


Рисунок 5 – Зависимость температуры воды на входе в экономайзер $t_{вх}^{эк}$ от относительной мощности ГТД $\bar{N}_{ГТД}$ для различных t_n

Характерные перегибы на изолиниях $t_n = \text{const}$ (см. рис. 5) можно объяснить изменением соотношения между падением t' и увеличением $K_{ц}$ с уменьшением нагрузки ГТД.

Как видно из рис. 5, принятое схемное решение ТУК позволяет во всем диапазоне переменных режимов иметь $t_{ст} > 110^\circ \text{C}$, т.е. обеспечить низкие скорости коррозии даже в районе концевых поверхностей утилизационного котла, а также снизить величину $K_{ц}$.

Предварительно проведенный численный эксперимент по уменьшению $K_{ц}$ и его проверка непосредственно в условиях эксплуатации газотурбохода «Инженер Ермошкин» показали, что изменение $K_{ц}$ с 4 до 2 на номинальном режиме ГТД приводит к указанным в таблице результатам.

Таблица 1 – Результаты численного и натурального экспериментов

Параметр	Изменение параметра (при уменьшении кратности циркуляции с $K_{ц} = 4$ до $K_{ц} = 2$)	
	Численный эксперимент	Натурный эксперимент
Паропроизводительность	+5,24	+5,1
Давление перегретого пара	+5,2	+4,8
Температура:		
перегретого пара	-0,3	-0,5
отработавших газов	-1,5	-1,4
воды на входе в экономайзер	-10,3	-9,3
Мощность		
ПТ	+5,2	-
ГПТУ	+1,1	-
Удельный расход топлива	-1,1	-

Замер таких параметров, как расход топлива, мощность ПТ и ГПТУ в условиях эксплуатации не проводился, однако незначительное расхождение расчетных параметров с замеренными (при существенном изменении $K_{ц}$) позволяет считать достоверной оценку такого важного показателя, как удельный расход топлива.

Совместная работа с ПТ начитается с такого минимального режима ГТД, при котором теплота отработавших газов способна создать перегретый пар с определенным давлением ($P_{пт} \approx 0,4-0,5$ МПа), надежно обеспечивающим устойчивую работу эжектора конденсатора и концевых уплотнений ПТ. В связи с этим изобары перегретого пара

$P_{\text{ПП}} = 0,4$ МПа, проведенные по результатам расчета на рис. 2, 3, 5, ограничивают зону переменных режимов ГПТУ, где возможно получение мощности от пропульсивной ПТ.

Полученные результаты проведенного исследования показывают, что метод численного эксперимента на математической модели позволил решить целый ряд качественно новых вопросов работы ГПТУ на переменных режимах. Решение подобных задач экспериментальным путем связано либо с использованием дорогостоящих стендов, либо с длительными исследованиями непосредственно на судне в процессе эксплуатации при наличии трудностей размещения измерительной техники и обработки информации.

Выводы. Исследование статических характеристик в полном объеме позволило определить различные параметрические ограничения работы ГПТУ, смоделировать отдельные аварийные ситуации, получить информацию для расчета динамических и прочностных характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Г. В. Судовая газотурбинная установка / Г. В. Баженов, В. И. Романов, В. Т. Лисов // Морской флот. – 1976. – № 9.
2. Курзон А. Г. Судовые комбинированные энергетические установки / А. Г. Курзон, Б. С. Юдовин – Л. : Судостроение, 1981.
3. Романов В. А. Исследование низкотемпературной коррозии в газотурбинных установках с теплоутилизационным контуром / В. А. Романов. – Судостроение. – 1978. – № 1.

Єрмошкін М. Г., Ігнатенко О. А., Лукінова В. В. ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕУ СУДНА ТИПУ «ІНЖЕНЕР ЄРМОШКІН» НА РІЗНИХ РЕЖИМАХ НАВАНТАЖЕННЯ

Досвід експлуатації та теплотехнічні дослідження намітили подальші шляхи проектування такого типу судових енергетичних установок та їх грамотної експлуатації як на флоті, так і у ВМС.

Ключові слова: газотурбінна установка, статичні характеристики.

Ermoshkin N. G., Ignatenko A. A., Lukinova V. V. OPERATING EXPERIENCE AND THE RESULTS OF THE STUDY OF THE STATIC CHARACTERISTICS OF PP SHIP «ENGINEER ERMOSHKIN» ON VARIOUS MODES OF LOAD

Operating experience and safety research outlined further ways of designing this type of ship power plants and their proper use at fleet and Navy.

Keywords: gas turbine, static characteristics.

© Єрмошкін М. Г., Ігнатенко О. А., Лукінова В. В.

Статтю прийнято
до редакції 12.05.17

УДК 629.544:004.77

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ РОЗВАНТАЖЕННЯ СУДЕН-КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОБІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Журавська І. М., канд. техн. наук, докторант, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Україна, e-mail: irina.zhuravska@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8102-9854;

Мусієнко М. П., д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Україна, e-mail: musienko2001@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9228-2233;

Кулаковська І. В., канд. фіз.-мат. наук, в.о. завідувача кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Україна, e-mail: kulaknic@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8432-1850

Незважаючи на зростаючу комп'ютеризацію водних транспортних засобів, наразі процес обліку завантаження/розвантаження контейнеровозів здійснюється вручну тальманами. При такому порядку у капітана судна немає поточних даних щодо кількості розвантажених/завантажених контейнерів у кожній секції контейнеровозу. В роботі запропонований метод реєстрації контейнерів, що перенесені через борт судна портокраном, за допомогою мобільних пристроїв, які розміщуються на даху одного або декількох контейнерів у кожній секції. При відсутності у секції необхідної для обліку контейнерів кількості мобільних пристроїв, додаткові розносяться квадрокоптерами. Інформація капітану передається через розгорнуту на контейнеровозі локальну WiFi-мережу, навантаженість якої була оцінена шляхом математичного моделювання зазначеної мережі за допомогою зв'язного графу. Реєстрація події розвантаження/завантаження кожної секції визначається зміною стану не менше 20% пікселів матриці фотокамери мобільного пристрою за результатами аналізу траєкторії зображення.

Ключові слова: судно-контейнеровоз, квадрокоптер, локальна WiFi-мережа, фотокамера смартфона, навантаженість мережі, зв'язний граф.

Вступ. Незважаючи на зростаючу комп'ютеризацію водних транспортних перевезень, наразі процес обліку завантаження/розвантаження відбувається вручну працівником вантажного комплексу – тальманом, який є робітником стивідорної компанії і надає інформацію про стан вантажу капітану судна тільки у кінці зміни у вигляді звичайного звіту, який називається тальманською розпискою [1].

Компанії, які займаються перевезенням вантажу у контейнерах, несуть відповідальність за його збереження. Тому екіпаж має забезпечити необхідну остійність судна, контролювати його крен та диферент. Зважаючи на це, капітан має потребу у отриманні детальної інформації щодо завантаження/розвантаження судна у реальному часі, під час стоянки у порту [2].

Метою роботи є автоматизація обліку процесу розвантаження і завантаження контейнеровозів для економії часу і ресурсів екіпажу, виключення похибок обрахунків, зумовлених людським фактором. Для досягнення мети необхідно вирішити **задачу** надання капітанові судна у режимі реального часу на ноутбук/планшет або інший пристрій інформації про кількість вантажу у кожній секції контейнерів на судні. Визначити позицію кожного контейнера на судні можливо за допомогою трьох координат: *Bay* – секція, *Row* – ряд і *Tier* – ярус (рис. 1).



Рисунок 1 – Нотація обліку розташування контейнерів на палубі

Об'єктом дослідження є локальна мережа Wi-Fi, через яку вищезазначений пристрій у капітана повинен приймати дані від великої кількості пристроїв-реєстраторів, розміщених на судні та поєднаних у локальну мережу (рис. 2). Навантаженість каналів передачі даних у цій мережі та режими роботи таких пристроїв-реєстраторів і є предметом дослідження.

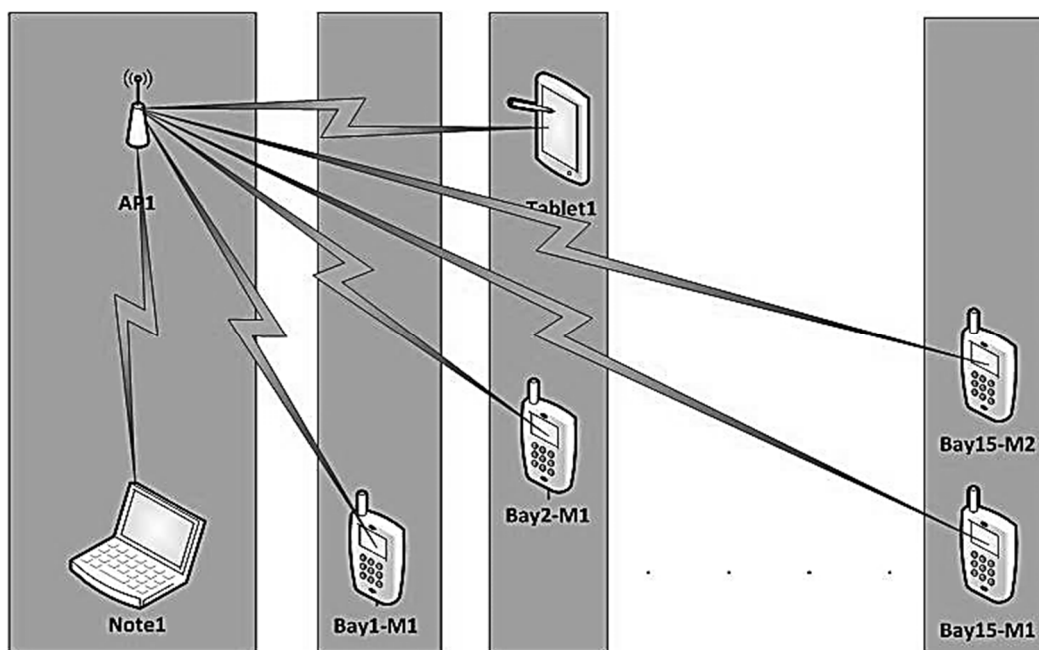


Рисунок 2 – Структурна схема локальної WiFi- мережі контейнеровозу

Нещодавно створено обчислювальний метод виявлення об'єктів, що рухаються, на серії CCD-кадрів, але він передбачає тільки малі рухи біля положення об'єкта [3]. Існують також системи, які передбачають для розгортання подібної системи обліку створення бездротового маршруту передачі інформації «судно – вантажний комплекс» [5, 6].

Але, на жаль, підключення судна у WiFi-мережу порту не завжди можливо за низкою технічних обставин (наприклад, металеві конструкції виробничих терміналів). У такому разі доцільно запропонувати рішення, за яким облікова система контейнеровозу працюватиме у власній локальній мережі та яка б не потребувала ані підключення до портових серверів, ані підключення до Інтернет.

Для впровадження висловленої ідеї на даху контейнерів у кожній секції ряду на палубі, найближчого до причалу, запропоновано розмістити мобільний пристрій на ОС Android, який реєструє контейнер, коли стріла портокрана переносить його над фотокамерою девайсу (рис. 3).

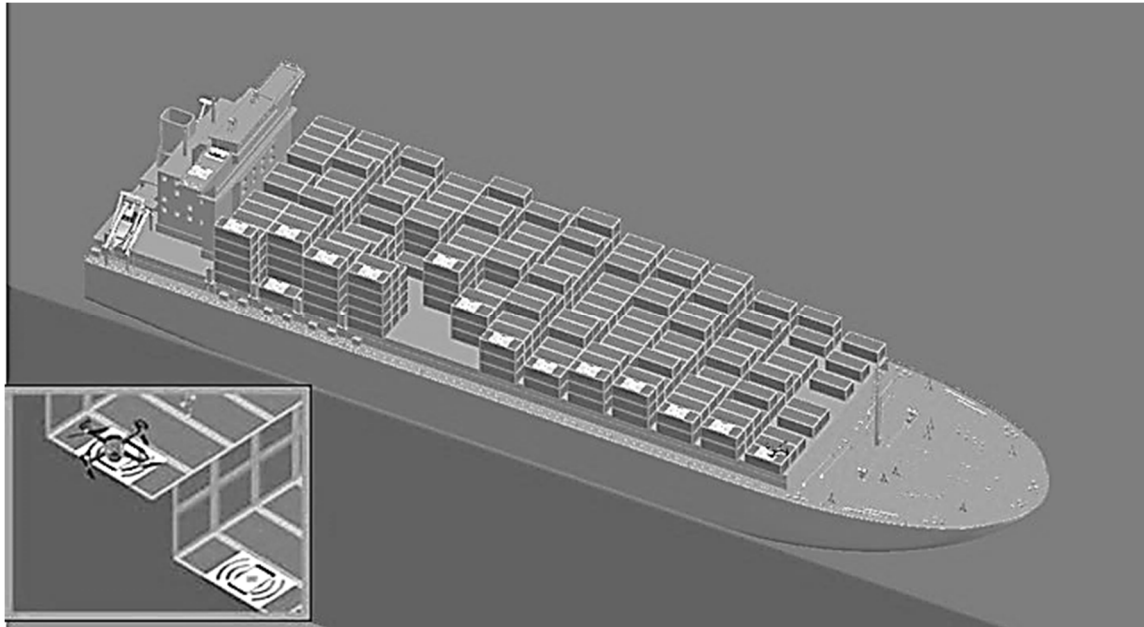


Рисунок 3 – Загальний вигляд судна-контейнеровозу з WiFi-реєстраторами

Для підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів кількість ярусів контейнерів на палубі може бути до 8–9 шт. У такому разі, при нерівномірному розвантаженні контейнерів у рядах, в кожній секції необхідно розмістити мобільні пристрої на даху найвищого ярусу та на декількох ярусах проміжної висоти до мінімального.

Методами дослідження є сукупність методів встановлення параметрів фотокамер мобільних пристроїв таким чином, щоб їх лічильники спрацьовували в момент проходження стріли портокрана з контейнером, що за/вивантажується, та змінені показання лічильників передавалися на пристрій капітана через бездротову локальну мережу судна-контейнеровозу.

Основні результати дослідження. Значення лічильника кадрів одразу після зміни стану пристрою, тобто фіксації руху, передається через локальну WiFi-мережу судна на пристрій капітана, де відображається зменшення кількості контейнерів у відповідній секції (рис. 4).

Коли мобільний пристрій разом з контейнером, на якому він розміщений, забирається портокраном, квадрокоптер приносить новий пристрій на найближчий до причалу контейнер у секції, де розташовувався попередній контейнер (рис. 3). Дрон переміщується виключно над судном, не заходячи на територію порту, що узгоджується зі стивідорною компанією, яка обслуговує судно-контейнеровоз у цьому порту.

Для реалізації описаного методу було розроблено програмне забезпечення (ПЗ) під керуванням ОС Android [6]. Слід підкреслити, для задач реєстрації руху та передачі даних в описаній бездротовій моніторинговій локальній мережі достатньо мінімальних технічних характеристик і ресурсу акумулятора мобільних пристроїв. Так, досліджувані мобільні пристрої дали позитивні результати у процесі реєстрації великого вантажу над

пристроєм вже на рівнях API Level 14–17, які відповідають версіям платформи Android 4.0–4.2 [7].

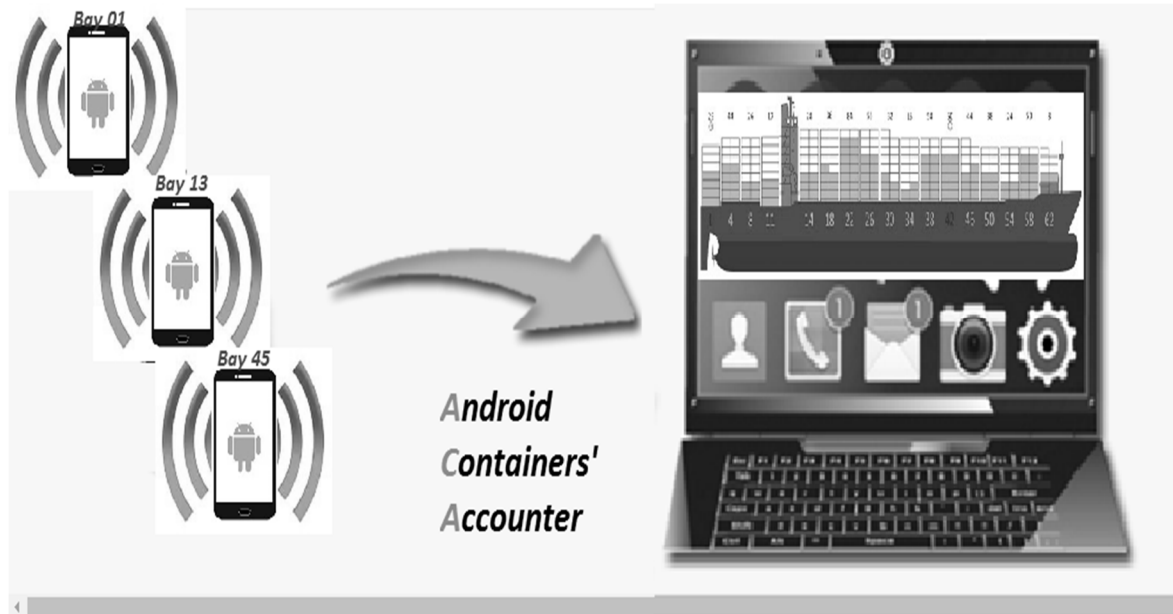


Рисунок 4 – Загальний вигляд графічного інтерфейсу на пристрої капітана

На даному етапі програма пристрою-реєстратора контейнерів працює за наступним алгоритмом.

Екран пристрою при працюючому додатку стає максимально бляклим, більш бляклим, аніж це можливо зробити за допомогою кареток, що є елементами меню пристрою, а також виставлений у режим FLAG_KEEP_SCREEN_ON, що не дає екрану гаснути навіть після тривалої взаємодії з тач-скріном.

Оскільки оперативна пам'ять (RAM – Random Access Memory) у продуктивній версії системи пристроїв припускається якомога низька (до 512 Мбайт), повинна бути забезпечена висока продуктивність обробки зображень. Цього було досягнуто шляхом використання найменшого можливого розширення, що виставляється для кожного пристрою програмним шляхом при першому запуску пристрою. Це неухильно означає втрату якості зображення, проте вона є не першорядною для даної системи.

У подальших версіях через виникнення можливої потреби у вищому розширенні зображень (наприклад, для кешування), можлива модифікація не у бік погіршення якості зображення, а розпаралелювання процесу обробки даних між потоками виконання.

Щоб фіксація руху предметів перед камерою була адекватною та об'єктивною, потрібно виключити вплив руху самого пристрою. Оскільки, навіть уживані Android-пристрої мають акселерометр, бо мають можливість перевертання екрана при повороті пристрою, він є єдиним точним та чутливим сенсором, потрібним для встановлення режиму «У русі» для пристрою.

Підписавши слухача у вигляді SensorActivity, на зміну сенсорів пристрою у методі onSensorChange(SensorEvent event) відбувається обробка даних, отриманих із event-об'єкта, що містить ці дані, зміна котрих і спричинила виклик методу.

Акселерометр повертає масив, що містить три значення у m/c^2 (усі значення у системі одиниць SI):

- values[0]: Прискорення мінус G_x по осі X;
- values[1]: Прискорення мінус G_y на осі Y;
- values[2]: Прискорення мінус G_z на осі Z.

Датчик цього типу вимірює прискорення, що діє на пристрій Ad. Він робить це шляхом вимірювання сил, що діють на сам датчик F_s , використовуючи співвідношення (1):

$$A_d = - \sum F_s / \text{mass}. \quad (1)$$

Зокрема, сила тяжіння завжди впливає на вимірне прискорення:

$$A_d = - g - \sum F / \text{mass}. \quad (2)$$

Через цю причину, коли пристрій лежить нерухомо та ймовірно не прискорюється, акселерометр зчитує величину $G = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Точно так, коли пристрій знаходиться у стані вільного падіння, а отже змінює прискорення у напрямку до землі на $9,81 \text{ м/с}^2$, його акселерометр зчитує величину 0 м/с^2 .

Шляхом проведення експериментів було встановлено, що приблизне значення, при якому значення прискорення змінюється хоча б на одній з осей, є «1» (одиниця). Тобто, якщо різниця минулого зафіксованого будь-якого із осьових значень є більшою за «1», то фіксація руху на зображенні камери не відбудеться.

Аналогічні процедури проводяться для пристроїв, що мають сенсор, сприйнятливий до змін значення магнітного поля. У даному випадку, граничними значенням, що спиняє процес роботи фіксації камерою, є також «1» (одиниця), яку отримано шляхом апроксимації експериментально отриманих даних.

Для отримання достовірних даних потрібно було виключити випадок дублювання фіксації одного й того ж контейнера, що проходить приблизно за однаковий проміжок часу. Використаємо метод *callback*, котрий відповідає за отримання байтів із зображення, зробленого камерою. Тоді в *onPreviewFrame(byte[], Camera)* першим параметром є той самий масив байтів, котрий підлягає обробці, а другим – об'єкт камери, що фіксує зображення.

Частота виклику цього методу операційною системою безпосередньо залежить від *FPS (frames-per-second)*, встановленому на пристрої програмно. Це є значення частоти отримання кадрів за секунду. Можливі значення було отримано програмним шляхом із списку доступних *FPS* у пристрої – із методу *Camera.getSupportedFps()*.

UML-діаграма класів клієнтського додатку пристрою-реєстратора наведена на рис. 5.

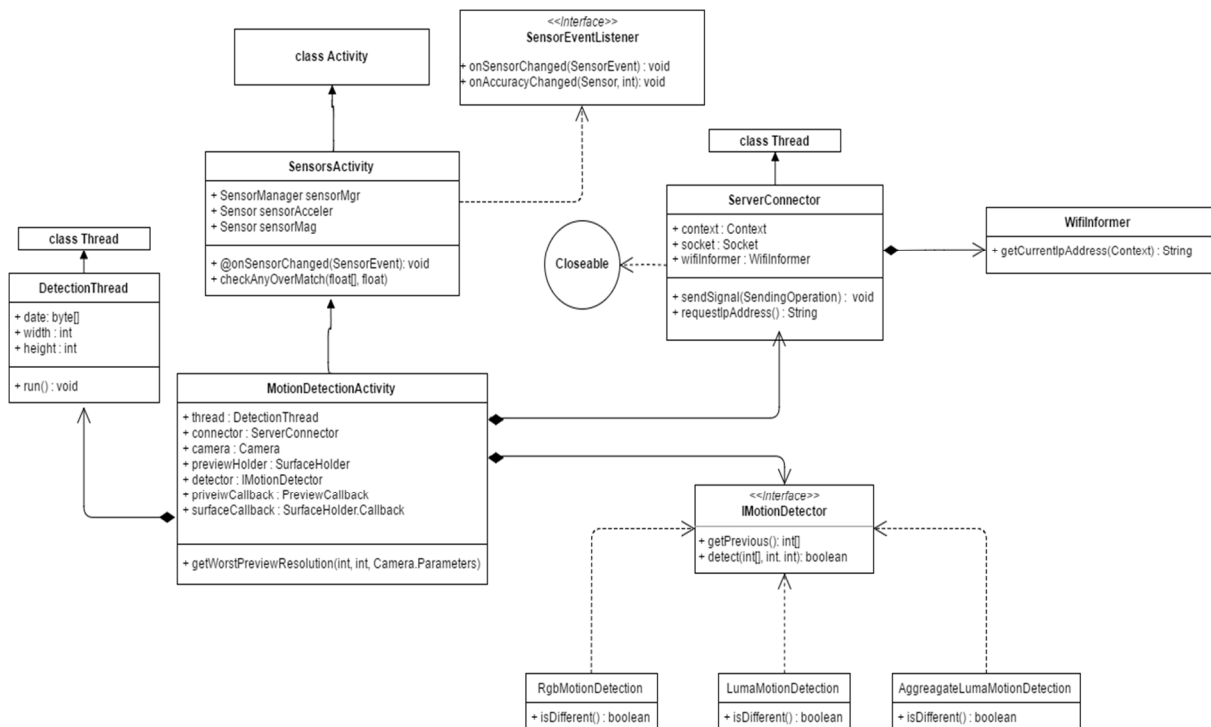


Рисунок 5 – Діаграма класів клієнтського додатку програми Motion Detector

Експериментально було встановлено, що частоти хоча б 1 кадр/с досягти неможливо програмним шляхом. Тому було вирішено налаштувати не частоту отримання кадрів, а лише проводити обробку зображення, а цей процес уміщує у собі конвертацію пікселів із формату *YUV420SP* у *ARGB*, перевірку даних акселерометра на нерухомість пристрою і перевірку схожості зображень попіксельно, щосекундно або за інші проміжки часу, які можна встановити програмно. «Старіння» даних при виконанні розрахунків для фіксації руху є неможливим, оскільки системний метод *onPreviewFrame* викликається із великою частотою *FPS*, що набагато більша за бажану частоту замірів, передаючи на обробку «свіжі» дані.

Оригінальне візуальне оформлення програми, що відображає зміни на сервері для особи, відповідальної за завантаження/розвантаження контейнерів, включає в себе анімаційні ефекти, які безпосередньо залежать від даних, які надходять від пристроїв-реєстраторів. UX побудований досить ергономічно і компактно, одночасно і функціонально, оскільки дає можливість користувачеві своєчасно отримати інформацію не тільки про завантаженість беїв, а й про доступність пристроїв-реєстраторів, якості їх зв'язку з сервером.

Працездатність і завантаженість моніторингової облікової *WiFi*-мережі контейнеровозу була оцінена шляхом математичного моделювання зазначеної мережі за допомогою зв'язного графу.

Мережі *ad-hoc*, або як їх ще називають бездротові самоорганізовані мережі, є децентралізованими бездротовими мережами, де всі вузли є рівноправними з точки зору управління мережею [8]. В таких мережах відсутні виділені сервери, де кожен вузол використовується або як клієнт, або для виконання функцій сервера, що дозволяє зберігати працездатність мережі при будь-якій кількості доступних вузлів. При функціонуванні мережі з різних причин можуть губитися зв'язки між окремими вузлами, тобто конфігурація мережі непостійна і, найчастіше, непередбачувана.

Для мережі такої змінної топології доцільно використовувати математичну модель невизначеності структури мережі як випадковий граф [9]. У такому разі оцінюються теоретико-ймовірнісні характеристики потоків у випадкових графах [10].

Представимо мережу у вигляді зв'язного графа $G = (V, U)$, де V – множина вершин або вузлів, U – множина ребер, та змінної множини W повідомлень (пакетів), які генеруються в ході роботи мережі. Розглянемо мережу з фіксованою кількістю вузлів n . Інші складові мережі вважатимемо випадковими.

Множина графа $G = (V, U)$ формується наступним чином: генерується випадкове число $|U|$ – потужність множини вершин, виходячи з дискретного розподілу ймовірностей PU . Далі з множини $V \times V \setminus \text{diag}(V \times V)$ рівномірно обирається $|U|$ різних вершин, які утворюють випадкову множину U' . Утворений граф $G = (V, U')$ – зв'язний (від дерева з однією вершиною до дерева з n вершинами), тоді $U' \subset U$.

В мережі кожний вузол v_i , $i = 1..n$ є джерелом потоку повідомлень w_i до деякого кореневого вузла v_j , $j = 1..n$, $j \neq i$, в якому повідомлення цього потоку повинні оброблятися. Потік w_i – це випадковий дискретний процес з кінцевою кількістю подій передачі повідомлень. Кількість подій в потоці – випадкова величина з дискретним розподіленням ймовірностей PS . Її значення не перевищує числа P . Інтервали часу τ_i між послідовними подіями в потоці описуються функціями розподілу ймовірностей $A_i(x)$ (скільки вузлів буде задіяно для передачі повідомлення).

Первинні процеси w_i (проходження контейнера над вузлом-реєстратором) породжують потоки дублюючих повідомлень, кожне передане повідомлення в мережі йде через цільовий вузол обробки. При надходженні повідомлення до цільового вузла, воно обробляється протягом часу σ_i з функцією розподілу ймовірностей $R_i(x)$ (через перевантаження центрального вузла і створення черги FIFO).

Сумарно первинні процеси утворюють багатовимірний (розподілений по вузлах мережі) випадковий процес W з кінцевим числом подій. Цей процес не визначається

однозначно тільки множиною первинних процесів $\{w_i\}$. Він залежить також від алгоритму R маршрутизації. Використовується оптимальна маршрутизація, заснована на прогнозі часів очікування та обробки повідомлення від вузла-джерела до цільового вузла. Основними завданнями аналізу є вивчення таких характеристик розподіленого випадкового процесу W :

- 1) час α відповіді на повідомлення від моменту генерації вузлом-джерелом до моменту одержання його цільовим вузлом);
- 2) час β обробки потоку дублюючих повідомлень (від генерації першого повідомлення до отримання останнього повідомлення з одної секції);
- 3) відношення числа повідомлень у процесі W до загальної можливості надходження подій в первинних процесах $\{w_i\}$.

Обчислювалися функції розподілу ймовірностей за наведених умовах (1):

$$RM(x) = P\{\alpha \leq x\} \text{ та } RS(x) = P\{\beta \leq x\}, \quad (3)$$

для кількості вузлів у мережі $n = 1 \dots 20$.

Була поставлена задача маршрутизації повідомлень у системі складної структури, заснованої на ефективному виконанні всіх процесів, які протікають у цій системі. Стан системи визначається величезною кількістю повідомлень, які обробляються та очікують у черзі на обробку повідомлень. Потрібно визначити оптимальний час обробки повідомлень в кореновому вузлі, витративши при цьому мінімальний час (виокремлення дублюючих).

При представленні моделі в часі кожний вузол та повідомлення мають структуру, подану на рис. 6.



Рисунок 6 – Елементи моделі бездротової мережі контейнеровозу

Аналіз ефективності маршрутизації проводився на подійно-орієнтованій моделі, яка задовольняє наступним умовам:

- зміна часу роботи моделі залежить від кількості повідомлень, які змінюють стан моделі та її навантаженість;
- логіка настання подій визначає кількість згенерованих вузлів та надісланих повідомлень з одної секції, які пов'язані з настанням цих подій.

Під час виконання випадково згенерованої системою моделі в конкретний момент часу t утворюється список вузлів (вершин) в кожній секції та список надісланих від них повідомлень, кожне з яких має свою імовірність появи. Після чого обчислюється загальний час на обробку згенерованої моделі (рис. 7).

Враховуючи, що в портах зазвичай не задіюють більше чотирьох кранів для завантаження/розвантаження одного судна, необхідно ввести функцію вибору ймовірнісного розташування кранів та вибору секції, з якою працюють портокрани.

При імітації систем великих масштабів для оцінки стійкості даних необхідно коректне обчислення параметрів, при яких виконання таких систем буде надійним. Розглянемо ці параметри і залежність кінцевих даних від цих змінних:

- 1) кількість вершин графа $|V|$;
- 2) кількість згенерованих розміщень вершин графа. Для отримання коректних даних необхідні розгляд і обчислення даних по всім можливим генераціям графа. Тобто, маючи

$|V|$ кількість вершин, потрібно розглянути всі можливі варіанти генерації цих графів, кожен раз генеруючи новий набір розміщень вузлів з множини V .

3) кількість надісланих повідомлень з кожного графа. Після генерації графа необхідне проходження певної кількості тестів для виявлення надійних даних (порядок повідомлень повинен йти в порядку зростання номеру вершин).

4) розмірність потоку (знаходження дублюючих). Варто враховувати, що при кожному проході відбувається повторне породження потоків повідомлень $w_i \in W$ однієї і тієї ж розмірності.

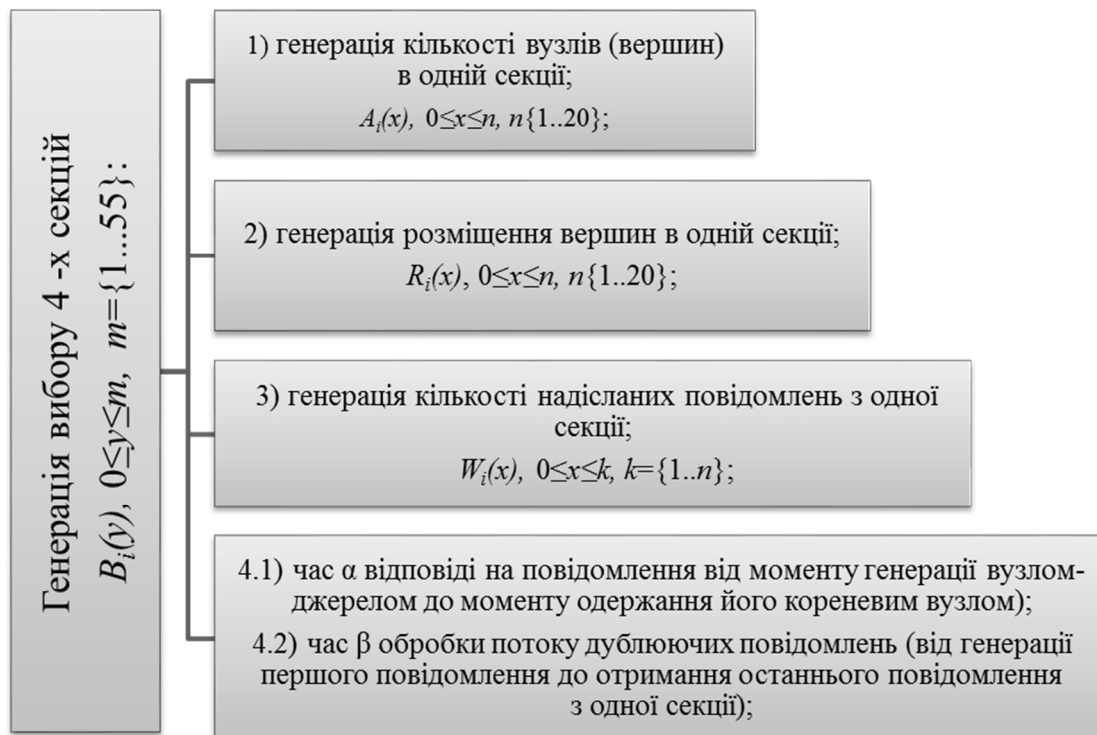


Рисунок 7 – Порядок генерації функції моделювання ймовірностей надходження повідомлень на кореневий вузол

Висновки. В роботі розглянуто питання, пов'язані з функціонуванням сучасних бездротових комп'ютерних мереж, які розгортаються в межах відокремленого технологічного об'єкта (судна-контейнеровозу). Побудована математична модель для проведення оцінки вартості потоків на графах сегментів бездротової комп'ютерної мережі при розвантаженні контейнеровозів та розраховано навантаження трафіку сегменту топології мережі для одного з *Bayplan* (вантажного плану на 4 секції).

Впровадження системи автоматизації обліку розвантаження суден контейнеровозів дозволить капітану дізнаватися, скільки контейнерів розвантажено з кожного ролу в режимі реального часу, тобто автоматизувати облік розвантаження контейнеровозу. Це, в свою чергу, дозволить капітану зберегти метацентричну висоту в допустимому діапазоні, тобто запобігти утворення крену і диференту судна, зменшити паперовий документообіг, підвищити продуктивність праці, скоротити час на обробку інформації.

Як наслідок, утворюються додаткові тимчасові ресурси для розробки і реалізації нових економічних і інвестиційних проектів. Таким чином вирішується проблема відшкодування і рентабельність впровадження моніторингової мережі на базі мобільних пристроїв, що розміщуються за місцем моніторингу за допомогою дронів.

Перспективи роботи. Перспективами подальшого розвитку роботи є вивчення основних характеристик поведінки розподілених випадкових процесів, що протікають в аналізованій системі. Необхідно створення технології для імітації процесів та проведення необхідних тестів для забезпечення коректності та стійкості вихідних даних. Бажано провести аналіз залежності кількості надісланих повідомлень, загального часу обробки повідомлень і навантаження корневих вузлів, визначити оптимально-мінімальну

кількість тестів для імітаційної моделі мережі. Провести дослідження поведінки і час обробки первинних і вторинних процесів залежно від кількості вершин, які задаються в системі.

Для організації кросплатформеності ПЗ розробленої автоматизованої системи немає необхідності повністю переписувати код додатка. Алгоритм визначення руху об'єктів, який використано, сам по собі є універсальним. Проте при розробці додатків для інших мобільних операційних систем (*Windows Mobile, iOS* тощо) необхідно буде використовувати відповідні нативні бібліотеки для маніпулювання робочими режимами камер реєстраторів.

Для подальшого розвитку методу реєстрації великих об'єктів доцільно дослідити можливості датчика освітленості мобільних пристроїв у разі тривалого перекриття такого датчика контейнером, що рухається.

Такий комплексний підхід надасть можливість швидшого масового поширення продукту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ушаков Д. В. Организация контейнерных перевозок грузов. – М. : ТрансЛит, 2015. – 208 с.
2. Container Stowage Planning and how it works [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://panbras.com.br/CONTAINER%20STOWAGE%20PLANNING.pdf>.
3. Накул Ю. А. Модель системи завантаження крупнотонажних суден / Ю. А. Накул, Стовманенко В. О. // Наукові праці [Чорномор. нац. ун-ту ім. Петра Могили]. Серія : Комп'ютерні технології : наук.-метод. журн. – 2016. – Т. 275, Вип. 287. – С. 27–33.
4. Нікольський В. В. Система підтримки прийняття рішення по навантаженню великотонажного контейнеровоза / В. В. Нікольський М. В. Нікольський, Ю. А. Накул // Наукові праці [Чорномор. нац. ун-ту ім. Петра Могили]. Серія : Комп'ютерні технології : наук.-метод. журн. – 2016. – Т. 271, Вип. 283. – С. 70–73.
5. Хламов С. В. Разработка вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии ссд-кадров / С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, С. С. Орышич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 2/9 (80). – С. 41–48.
6. Харди Б. Android. Программирование для профессионалов ; 2-е изд / Б. Харди, Б. Филлипс, К. Стюарт, К. Марсикано. – М. : Питер, 2016. – 640 с.
7. Уровни API, версии Android, –target, файл AndroidManifest.xml [Електронний ресурс] / Бражников Р. – Опубл. 2015/03/20. – Режим доступа : <http://romanbrazhnikov.ru/blog/2015/03/20/уровни-апи-версии-android-target-файл-androidmanifest-xml/>.
8. Миков А. И. Стохастические характеристики разрезов в графах AD НОС сетей // Информатизация и связь. – 2014. – № 1. – С. 76–79.
9. Karnon J. Modeling using discrete event simulation // Medical decision making. – 2012. – P. 705–706.
10. Hekmat R. Ad-hoc networks: Fundamental properties and network topologies. – Zoetermeer, The Netherland : Springer, 2006. – 154 p.

REFERENCES

1. Ushakov D. V. (2015) *Organization of container cargo transportation*. M. : TransLit.
2. Container Stowage Planning and how it works [Electronic resource]. Available at: <http://panbras.com.br/CONTAINER%20STOWAGE%20PLANNING.pdf>.
3. Khlamov S. V., Savanevich V. E., Briukhovetskyi A. B., Oryshych S. S. (2016) Development of a computational method for detecting near zero visible motion of objects on a

series of CCD-frames. *Eastern-European Journal of enterprise technologies*. No 2/9 (80). – 41–48.

4. Nakul Y. A., Stovmanenko V. O. Model of system for transport tonnage ships downloading. *Scientific papers*. Series «Computer Technology». Vol. 275, Issue 287. 27–33.

5. Nikolskiy V. V., Nikolskiy M. V., Nakul Y. A. (2016) Decision support system for loading bulk container carriers. *Scientific papers*. Series «Computer Technology». Vol. 271, Issue. 283. 70–73.

6. Brazhnikov P. (2015) API Level, v. Android, –target, file AndroidManifest.xml [Electronic resource]. Available at : <http://romanbrazhnikov.ru/blog/2015/03/20/уровни-апи-версии-android-target-файл-androidmanifest-xml/>.

7. Khardi B., Phillips B., Stewart C., Marsicano C. (2016) *Android. Programming for professionals*; 2nd ed. M. : Питер.

8. Hekmat R. (2006) *Ad-hoc networks: Fundamental properties and network topologies*. Zoetermeer, The Netherland : Springer.

9. Mykov A. I. (2014) Stochastic characteristics of sections in AD HOC graphs. *Informatization and communication*. No 1. 76–79.

10. Karnon J. (2012) Modeling using discrete event simulation. *Medical decision making*. 705–706.

Журавская И. Н., Мусиенко М. П., Кулаковская И. В. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УЧЁТА РАЗГРУЗКИ СУДОВ КОНТЕЙНЕРОВОЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Несмотря на растущую компьютеризацию водных транспортных средств, пока процесс учета загрузки/разгрузки контейнеровозов осуществляется вручную тальманами. При таком порядке у капитана судна нет текущих данных о количестве разгруженных/загруженных контейнеров в каждой секции контейнеровоза. В работе предложен метод регистрации контейнеров, перенесенных через борт судна порткраном, с помощью мобильных устройств, размещаемых на крыше одного или нескольких контейнеров в каждой секции. При отсутствии в секции необходимого для учета контейнеров количества мобильных устройств, дополнительные разносятся квадрокоптерами. Информация капитану передается через развернутую на контейнеровозе локальную WiFi-сеть, нагруженность которой была оценена путем математического моделирования указанной сети с помощью связного графа. Регистрация события разгрузки/загрузки каждой секции определяется изменением состояния не менее 20 % пикселей матрицы фотокамеры мобильного устройства по результатам анализа траектории изображения.

Ключевые слова: судно-контейнеровоз, квадрокоптер, локальная WiFi-сеть, фотокамера смартфона, нагруженность сети, связный граф.

Zhuravska I. M., Musyienko M. P., Kulakovska I. V. AUTOMATED SYSTEM USING MOBILE TO UNLOAD THE CONTAINER SHIPS

Despite the growing computerization of water vehicles, the recording process of the loading/unloading of container ships is carried out manually by talmans now. In this way, the captain of the vessel does not have the current data on the number of unloaded/loaded containers in each section of the container ship. The paper proposes a method for registering containers carried onboard by a port crane. This method uses mobile devices placed on the roof of one or more containers in each section. If there is no enough number of mobile devices in the section which are necessary for accounting the containers, additional ones are carried by quadcopters. The information is transmitted to the captain through a local Wi-Fi network deployed on the container ship. The network loading was estimated by mathematical modeling using a messenger graph. The registration of an unloading/loading event of each section is determined by a change in the state of at least 20 % of the pixels of the camera matrix of the mobile device based on the basis of the analysis of the image trajectory.

Keywords: container ship, quadcopter, local Wi-Fi network, smartphone camera, network loading, connected graph.

© Журавська І. М., Мусієнко М. П., Кулаковська І. В.

Статтю прийнято
до редакції 03.05.17

УДК 621.472

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУДОВОЙ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ РАЗВИТИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Настасенко В. А., к.т.н., доцент, профессор кафедры транспортных технологий Херсонской государственной морской академии, e-mail: Nastasenko2004@front.ru

В работе проведен анализ основных вредных выбросов при сжигании в судовых ДВС традиционных топлив на базе нефти и газа. Показано, что их уменьшение возможно при переходе на водородное топливо и при замене топлива альтернативной энергетикой, среди которой для транспортных судов используют потопные парусные и встречные барабанные ветряные энергетические системы, солнечные фотоэлектрические, и гидроволновые системы. Однако внедрение судовой альтернативной энергетикой при стоимости судового топлива <450 € становится дотационным и непривлекательным для частного капитала, что сдерживает возможности ее развития, поэтому требуется пересмотр ценовой политики в сфере топлив на базе нефти и газа.

Ключевые слова: судовая ветряная, солнечная и гидроволновая энергетика.

Введение. Связь проблемы с общими направлениями научных исследований.

Работа относится к сфере альтернативной энергетики на транспортном флоте и технико-экономическим проблемам ее развития и применения.

Анализ состояния проблемы, постановка цели и задач работы. Известно [1], что суда транспортного флота потребляют в год 600...650 млн. т. топлива на базе нефти, что составляет около 7...8 % ее годовой мировой добычи, которые безвозвратно теряются. Поскольку запасы нефти непрерывно уменьшаются и могут быть исчерпаны в текущем столетии [2], эта перспектива составляет потенциальную угрозу для всего человечества.

Другой потенциальной угрозой является выделение при сжигании традиционного топлива до 2300 млн. т., или 8 % от общего объема, выбросов газов парниковой группы [1] – оксида углерода CO и диоксида углерода CO₂, которые ведут к усилению парникового эффекта, также опасного для всего человечества. Переход на очищенное топливо уменьшит лишь выбросы вредных веществ, но не уменьшит выбросы CO₂ (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительные количественные показатели вредных выбросов при сжигании традиционных судовых топлив [3]

Тип топлива	Количество вредных выбросов, г/(кВт·ч) (по данным MARINTEC)			
	SO _x	NO _x	CO ₂	Твердые частицы
Мазут (3,5 % масс. соединений серы)	13	9 – 12	580 – 630	1,5
Морское дизельное топливо (0,5 % масс. соединений серы)	2	8 – 11	580 – 630	0,25 – 0,5
Очищенное дизельное топливо (0,1 % масс. соединений серы)	0,4	8 – 11	580 – 630	0,15 – 0,25
Природный газ (сжатый или сжиженный)	0	2	430 – 480	0

Замена топлив на базе нефти – природным газом отодвигает сроки его исчерпания на 20...40 лет. Однако газ уменьшает лишь объемы вредных выбросов (табл. 1), а по CO₂, с учетом более низкой его калорийности и потребности увеличения расхода на достижение одинаковой мощности судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – реального уменьшения выбросов CO₂ не достигается, что не решает проблемы парникового эффекта. В условиях развития транспортного флота он является одним из растущих источников выбросов вредных веществ и газов парниковой группы в атмосферу Земли.

Таким образом, проблема уменьшения выбросов CO и CO₂ является важной и актуальной задачей, решению которой был посвящен Парижский Саммит 2015 года [4].

На транспортном флоте ее решение возможно двумя путями: 1) переходом на иные виды топлив, из которых наиболее эффективен водород H₂, поскольку при его сжигании образуется экологически чистый продукт – вода [5]; 2) экономией расхода топлива [3].

Экономия расхода топлива для судов осуществляется различными путями, в т.ч.:

1. Уменьшением мощности судовых потребителей энергии.
2. Увеличением эффективности ДВС и пропульсивной установки.
3. Прямой экономией расхода топлива при использовании топливных смесей: нефте-водных, нефте-газовых, водно-угольных и др.
4. Использованием нетрадиционной энергетики.

Все эти пути развиваются в настоящее время, однако возможности первых 3-х – близки к техническому пределу, поэтому более перспективен 4-й путь, что подтверждают проекты экологически чистых судов будущего, примеры которых приведены в работах [6–8]. В данной работе также основное внимание уделено 4-му пути, в частности:

- 1) ветряной энергетике;
- 2) солнечной энергетике;
- 3) гидроволновой энергетике.

Определение технико-экономических показателей и особенностей применения на судах систем альтернативной энергетики является *главной целью выполняемой работы*.

Научную новизну выполняемой работы составляет технико-экономический анализ наиболее эффективных условий применения альтернативной энергетики на транспортном флоте и разработка на их базе рекомендаций по ее развитию.

Основные виды судовых ветряных систем и их технико-экономический анализ.

Среди основных видов судовых альтернативных энергетических систем на транспортном флоте, в первую очередь, развиваются ветряные и солнечные. Объясняется это тем, что на суше они получили широкое распространение и накоплен большой опыт их изготовления и эксплуатации. Однако автоматический перенос их на суда транспортного флота ведет к комплексу проблем, поскольку конструкции судов и условия их эксплуатации имеют свои отличительные особенности, основными из которых являются:

1. Потребность перевозки грузов на палубе.
2. Потребность своевременной доставки грузов.
3. Большие мощности основных судовых энергетических установок.
4. Отсутствие места для размещения нетрадиционных энергетических систем.
5. Работа в условиях сильного ветра, качки судна, воздействия волн, атмосферных осадков и агрессивных испарений морской воды.

Учитывая, что в недалеком прошлом суда в основном были парусными, основным видом применяемых ветряных систем в проектах судов будущего стали мачтовые и гибкие системы парусов *попутного принципа действия*.

Большой шаг в создании мачтовых парусных систем сделан в яхте «А» (рис. 1) [9]. Ее дедвейт 14,6 тыс. т., она имеет 3 карбоновые мачты, достигающие высоты 97 м, которые представляют собой высокоэффективную систему для эксплуатации и на других судах транспортного флота.

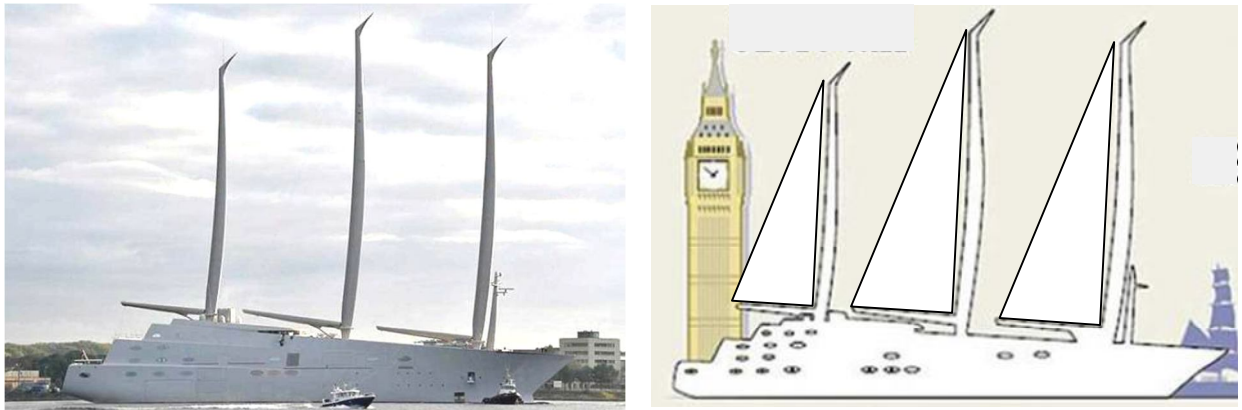


Рисунок 1 – Парусная яхта «А» российского миллиардера Мельниченко (Германия)

Увеличение количества мачт до 7 и более – позволяет довести дедвейт судна до 30...40 тыс. т., что приемлемо для многих транспортных перевозок. Поэтому, несмотря на высокую стоимость яхты ≈ 400 млн. \$, из которых доля затрат на мачты может быть оценена в 5...10% этой суммы, что составляет от 20 до 40 млн. \$, данные затраты нельзя считать напрасными – мачты и их парусные системы уже созданы, что может снизить будущие затраты на 1 мачту до 1...2 млн. \$.

Однако для своевременной доставки грузов среднейрейсовая скорость ветра должна составлять 7–10 м/с, что не всегда возможно. Поэтому на яхте «А», как и на других существующих парусных судах (рис. 2) [10], используются дублирующие судовые ДВС.



Рисунок 2 – Современное парусное судно «Royal Clipper» 1999 г. постройки круизной компании Star Clippers Incorporation

Кроме парусов общей площадью 5040 м^2 , что позволяет развивать судну скорость до 20 узлов, близкую к максимально допустимой скорости для эксплуатации парусов [11], «Royal Clipper» имеет 2 ДВС «Caterpillar» общей мощностью около 5000 кВт, позволяющих ему развивать скорость до 13 узлов при отсутствии ветра, что гарантирует безопасность его работы и своевременную доставку пассажиров в порт назначения.

Однако дублирование потребности движения судна от ДВС – требует выполнения на нем машинных отделений со всеми полагающимися им системами:

- 1) приемки, хранения, подготовки и транспортировки топлива с их цистернами, насосами, трубопроводами, сепараторами и системами их обслуживания;
- 2) приемки, хранения, подготовки и очистки масла для смазки и охлаждения;
- 3) подвода воздуха для сгорания топлива, отвода отработанных газов, вентиляции и освещения машинного отделения;
- 4) сжатия и хранения воздуха для пуска ДВС;
- 5) дейдвудного вала, ходового винта и их обслуживания;
- 6) тушения пожаров и других систем безопасности работы машинной команды;

7) автоматического и прямого управления работой ДВС и других обслуживающих его систем.

При этом уменьшается полезный объем и грузоподъемность судна, а также требуется обслуживающий персонал и затраты на его содержание.

Совокупность указанных факторов существенно снижает технико-экономические показатели альтернативных судовых энергетических систем. Без ДВС – их применение возможно только при нерегулярных перевозках в прогулочном варианте (на яхтах).

Кроме этого, мачтовые парусные системы имеют существенные недостатки при их эксплуатации, полный перечень которых приведен в работе [12]. Важнейшие из них:

1. Кренование судна под действием ветра и его порывов.
2. Невозможность использования палубы для перевозки грузов.
3. Потребность межтрюмных зон для установки основания мачт по килю судна.

Уменьшает указанные недостатки бортовое размещение на судне мачтовых систем с жесткими поворотными парусами (рис. 3), примененное в проекте [6].

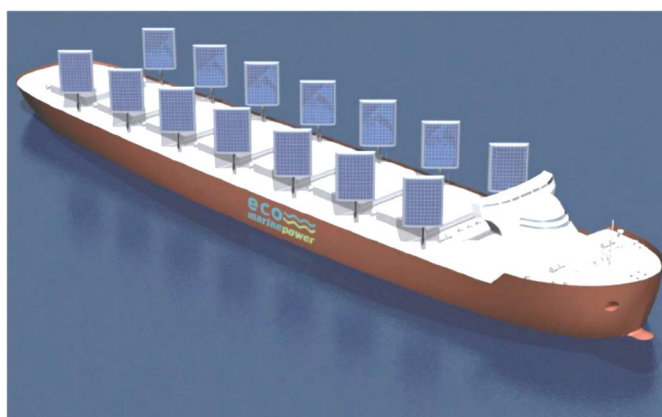


Рисунок 3 – Система поворотных мачтовых парусов в проекте судна 2025 года *eco marinepower*, объединенных с солнечными батареями (Япония)

В данной системе использован дополнительный эффект – объединения парусов с солнечными батареями, что применяется во всех проектах судов будущего, кроме [7], где солнечные батареи занимают всю поверхность крышек, закрывающих контейнеры, поэтому использованы гибкие паруса, убирающиеся в межтрюмное пространство во время шторма (рис. 4). При этом гибкие паруса дешевле и легче управляются при смене направления ветра.

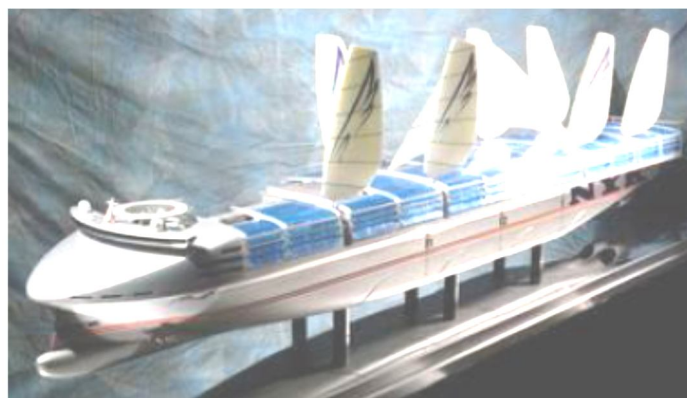


Рисунок 4 – Система гибких подъемных мачтовых парусов в проекте судна 2030 года «NYK Super Eco Ship» (Япония)

Важным преимуществом гибких систем (рис. 4) над жесткими (рис. 3) является более высокий КПД за счет вогнутости парусов [13].

Еще больший КПД имеют гибкие паруса попутного принципа действия «летающее крыло» системы «SkySails» проекта «Beluga» (Германия) [14] (рис. 5). Система дешевле и проще в эксплуатации, чем системы мачтовых парусов, а также обеспечивает возможность использования палубы для перевозки грузов при минимальном креновании корпуса судна.

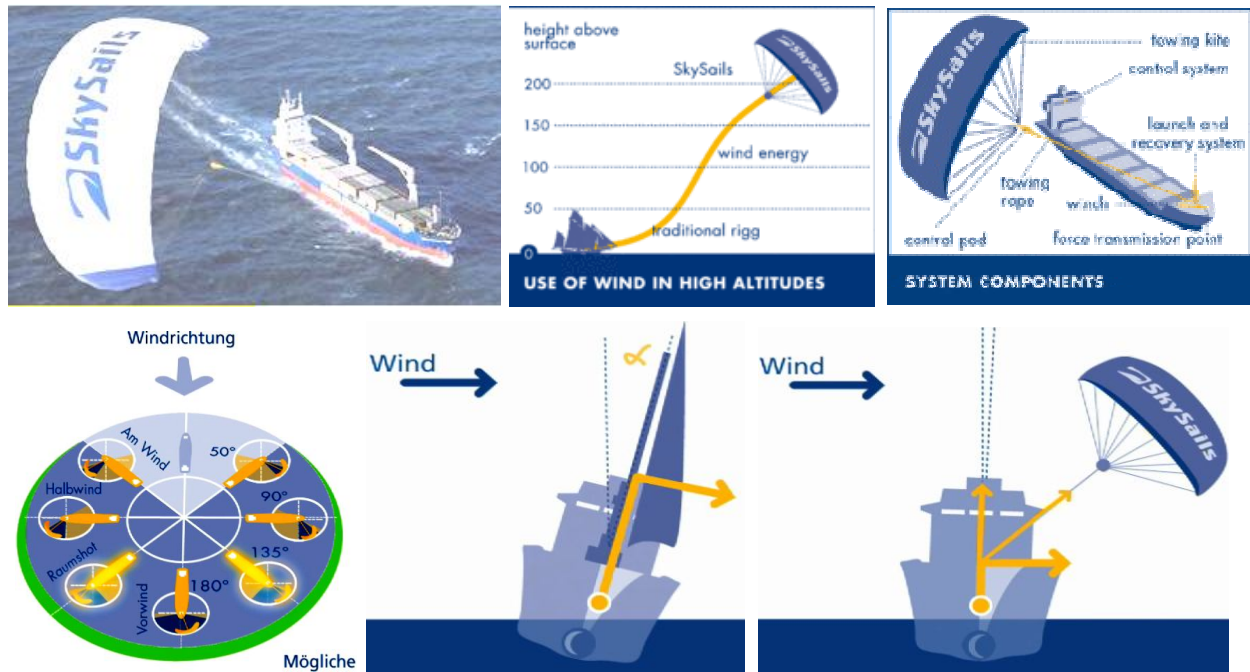


Рисунок 5 – Система парусов SkySails (Германия), принципы и условия ее действия

Однако общий недостаток всех систем попутного принципа действия – ограничение применения по скорости ветра: верхний предел 17...20 м/с – по условиям безопасности [11], а нижний предел 7...10 м/с – по условиям скорости доставки грузов, поэтому реальное их применение возможно в зонах устойчивого действия ветров, приведенных на рис. 6.

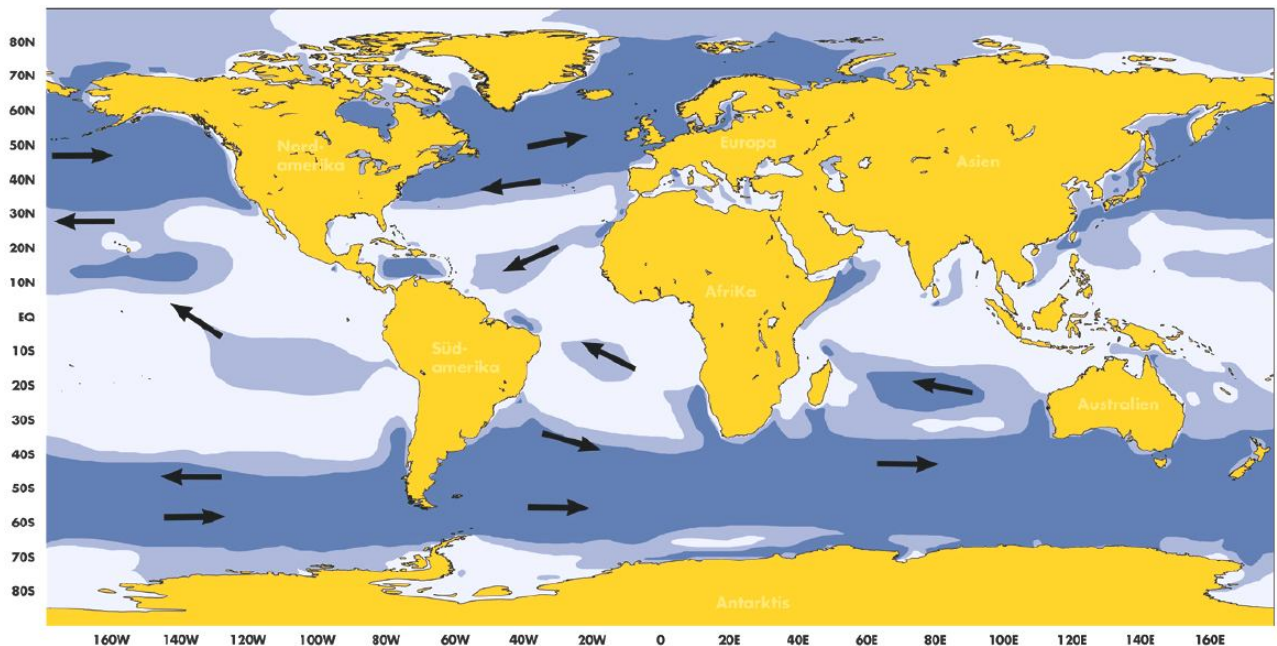


Рисунок 6 – Устойчивые направления действия ветровых потоков: ■ – сильный ветер 10...20 м/с, ▨ – умеренный ветер 5...10 м/с, ■ – слабый ветер до 5 м/с

На большинстве маршрутов – скорость ветра до 5 м/с. При этом устойчивость его действия варьируется, как по направлению, так и по силе, в т.ч. – в зависимости от времени

года и суток, что не обеспечивает постоянной скорости судна, поэтому подобные системы могут применяться только как дополнительные к главным ДВС.

Другим важным недостатком является то, что при встречном ветре система парусов попутного принципа действия лишь мешает движению судна.

По данным фирмы Zeppelin [14] тяга паруса системы SkySails составляет величину $P_{\Pi} = 0,5$ кН на 1 м^2 , которая растет прямопропорционально площади паруса, а мощность системы растет прямопропорционально превышению скорости ветра над скоростью судна, составляющую 7–10 м/с. В дальнейших расчетах принимаем среднеарифметическую скорость попутного ветра 14 м/с, используемую частично во время рейса (более точно эту долю можно определить для конкретного рейса с учетом стабильности ветров, показанных на рис.6). Тогда эквивалент мощности 1 м^2 системы составит 3,5...2 кВт/ч, а для получения дополнительной мощности в 1 МВт/ч потребуется площадь паруса от 300 до 500 м^2 . Такая мощность достигает от 20 % до 5 % мощности судовых ДВС в 5...20 МВт.

Стоимость системы SkySails с парусом площадью 320 м^2 и установкой ее на судне составляет около 700 тыс. € [14]. При эффективном использовании системы в среднем до $\frac{1}{3}$ общего времени выполнения морских переходов (≈ 250 суток в год по 12 часов в сутки, поскольку в ночное время ее применение затруднено), а общий эквивалент мощности ΣN_{Π} , выработанной за год, составит величину (1):

$$\Sigma N_{\Pi} = 1(\text{МВт} / \text{час}) \times 12(\text{часов} / \text{сутки}) \times \frac{1}{3} \times 250(\text{суток}) = 1000(\text{МВт}). \quad (1)$$

Для жесткой системы парусов (рис. 3) кпд не превышает 0,2, поэтому тяга составит величину $P_{\Pi} = 0,2$ кН на 1 м^2 , которая растет прямопропорционально площади паруса, а мощность системы растет прямопропорционально превышению скорости ветра над скоростью судна, составляющую 7...10 м/с. Тогда в условиях, аналогичных предыдущим, для годовой выработки 1000 МВт энергии площадь парусов должна достигать 800 м^2 .

Для повышения кпд в проектах подъемных парусов выполнены скругления на их боковых сторонах (рис. 7), что повышает их тягу до $P_{\Pi} \approx 0,3$ кН на 1 м^2 . Тогда в условиях, аналогичных предыдущим, для годовой выработки эквивалента 1000 МВт мощности площадь парусов должна составлять 530 м^2 . В проекте судна «CargoXpress» [15] она составляет 1200 м^2 и покрыта солнечными батареями, поэтому суммарная мощность системы может достигать 2,5 МВт.

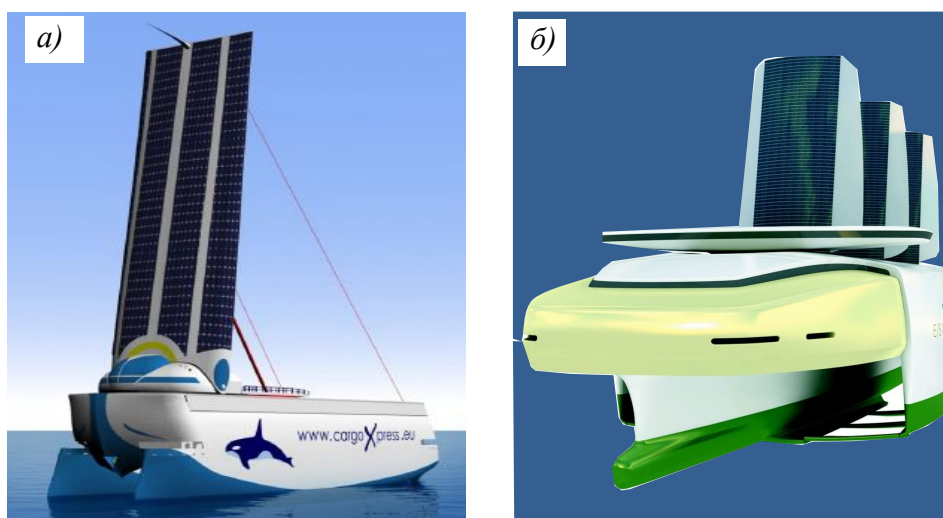


Рисунок 7 – Системы с жесткими подъемными парусами в проектах суден:
а) «CARGOXPRESS» (Испания), б) «E/S ORCELLE» (Швеция)

Аналогичное исполнение подъемных парусов с боковыми скруглениями выполнено в проекте судна E/S ORCELLE (Швеция) [8], показанного на рис. 7б.

Преимуществом поворотных систем [6] является возможность полного восприятия ветрового потока, а для подъемных систем [8, 15] – возрастает сложность обеспечения поворота паруса, поэтому при росте ветровых углов к курсовым их тяга падает. Учитывая более высокую сложность изготовления и эксплуатации известных поворотных (рис. 3) или подъемных (рис.7) парусных систем в проектах судов [6, 8, 15], их стоимость для получения эквивалента 1 кВт/ч мощности будет более высокой, чем в системе SkySails, а за счет более низкого КПД их технико-экономические показатели даже при эксплуатации 24 часов в сутки, будут ниже показателей системы SkySails при одинаковой парусности.

Наиболее эффективной системой можно признать мачтовую яхты «А», хотя средняя площадь ее косых парусов 2,6 тыс.м², что уступает площади 5 тыс. м² 42-х парусов судна «Royal Clipper», но они проще в обслуживании, а их вогнутый прогиб повышает КПД и тягу до 0,3 кН на 1 м² [13]. Поэтому при средней рейсовой скорости ветра ≈ 14 м/с, развиваемая яхтой А мощность может достигать 11 МВт/ч, тогда среднегодовая мощность ΣN_A при эксплуатации системы 24 часа в сутки составит:

$$\Sigma N_A = 11(\text{МВт} / \text{час}) \times 24(\text{часа} / \text{сутки}) \times \frac{1}{3} \times 250(\text{суток}) = 22000(\text{МВт}). \quad (2)$$

Поскольку средняя мощность 1-й мачты может составлять около 2,5 МВт/ч, то для 7-ми мачтового судна она составит около 17 МВт/ч, что приемлемо для судов дедвейтом до 40 тыс. т, широко применяемых в транспортном флоте.

Ветряная система встречного принципа действия [16] устраняет указанную зависимость от скорости ветра, поскольку может действовать при полном его отсутствии, только за счет собственной скорости судна 7...10 м/с. Она вырабатывает универсальную для применения энергию – электрическую, мощность которой растет при встречном ветре от скорости 1 м/с, до 20 м/с. Кроме того, работа системы возможна также на якорной стоянке фактически при любом направлении ветра, а у стенки пирса в порту – при встречном ветре, что реально сводит ее применение до 1/3 времени длительности года в 365 суток. Для данных систем [16] (рис. 8) наиболее эффективным является применение электрогенераторов с барабанными ветряными колесами 1, установленными вплотную на лобовой поверхности надстроек 2-го судна. При этом вредная работа сопротивления надстроек судна встречному потоку воздуха превращается в полезную работу ветряных колес. Такая система разработана для судна «Atlantic Bulker» (ДВС мощностью 15 МВт).

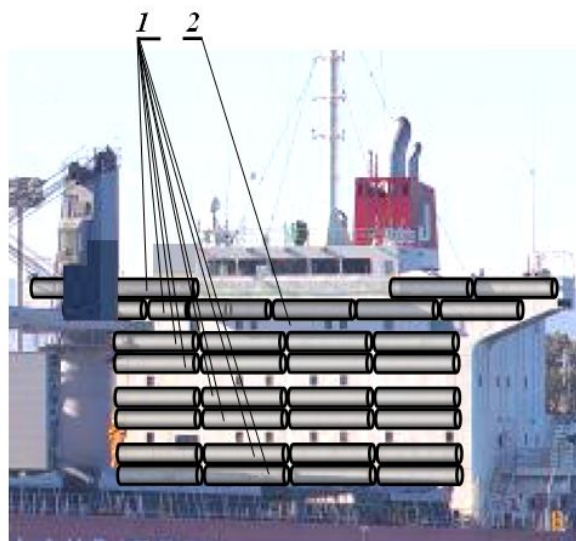


Рисунок 8 – Судовая ветряная система встречного принципа действия барабанного типа для судна «Atlantic Bulker» (Украина)

Мощность 1-го ветряного колеса диаметром 0,75 м и длиной 4 м при скорости судна 7 м/с и полном отсутствии встречного ветра составит 1,5 кВт/ч, а при средней рейсовой

скорости встречного ветра 14 м/с мощность достигает 18 кВт/ч. При установке на надстройке судна 32-х ветряных колес они обеспечат суммарную мощность до 0,6 МВт/ч, или от 12 до 3% мощности ДВС в 5...20 МВт. При стоимости модулей по 10 тыс. €, стоимости рамы для их установки на палубе судна 100 тыс. € и стоимости электрооборудования 300 тыс. €, общая их стоимость составит $10 \times 32 + 300 + 100 = 720$ тыс. €. Тогда при работе в среднем до $\frac{1}{3}$ длительности года в 365 суток по 24 часа в сутки общая мощность ΣN_K выработанной электроэнергии составит величину (3):

$$\Sigma N_K = 0,6(\text{МВт} / \text{час}) \times 24(\text{часа} / \text{сутки}) \times \frac{1}{3} \times 365(\text{суток}) = 1750(\text{МВт}). \quad (3)$$

Однако мощность ветряных систем встречного принципа действия не превышает 2...3 МВт, поскольку ограничена площадью сопротивления лобовых надстроек судна.

Технико-экономический анализ солнечных судовых энергетических систем. Для них предпочтительны фотоэлектрические системы, КПД которых в 2 раза выше тепловых систем и они широко используются в проектах судов будущего [6–8]. Их преимуществом также является выработка универсальной для потребления электрической энергии, однако среднегодовое время использования системы составляет ≈ 12 часов светового времени в сутки, т.е. половину от длительности года в 365 суток, за исключением 25 % пасмурных и дождливых дней, когда освещенность солнечных батарей падает до 50...90 %.

В солнечной судовой энергетике пока созданы лишь маломощные тихоходные суда, поскольку для обеспечения 1 МВт мощности требуется площадь солнечных батарей в 5,7 тыс. м², составляющих размеры 100 м \times 57 м – почти футбольное поле. Такие площади могут иметь только значительных размеров танкеры и крытые паромы.

При определении технико-экономических показателей существующих солнечных судовых электроэнергетических систем учтен опыт изготовления и эксплуатации катамарана «*Turanor Solar Planet*» [17] (рис. 9).



Рисунок 9 – Катамаран «*Turanor Solar Planet*», работающий на солнечных батареях (Германия)

Катамаран прошел испытания в 2007–2008 гг., совершив кругосветный переход за 584 суток. Площадь его солнечных батарей 537 м² и состоит из 38 тыс. фотоэлектрических панелей, генерирующих до 93,5 кВт/ч электроэнергии при удельной мощности системы 0,175 кВт/м². Она обеспечивает работу 2-х электродвигателей пиковой мощностью по 250 кВт, которые в стойком режиме развивают крейсерскую скорость 7,5 узлов, поэтому яхта существенно уступает в скорости обычным парусным яхтам, а ее эффективная эксплуатация возможна только в экваториальной зоне. Стоимость яхты 12,5 млн. €. При стоимости проекта около 20 % от стоимости яхты, которую можно исключить в следующих исполнениях, ее стоимость составит 10 млн. €, из которых до $\frac{1}{2}$ – стоимость раздвижных панелей с солнечными батареями и систем для накопления и передачи электроэнергии потребителям.

Для уменьшения стоимости подобных яхт швейцарской компанией «Solarwave» и турецкой судостроительной компанией «Nedship» в 2014 г. была построена 62-футовая яхта «Solarwave 62» (Солнечная волна-62) стоимостью ≈ 2 млн. €, показанная на рис. 10 [18].



Рисунок 10 – Яхта «Solarwave 62» фирмы «Solarwave» на солнечных батареях, построенная в 2014 г. судостроительной компанией «Nedship» (Швейцария – Турция)

Снижение цены яхты обеспечено уменьшением ее размеров и водоизмещения, снижением стоимости материалов и сокращением площади солнечных батарей до 80 м^2 , что привело к уменьшению их мощности до 15 кВт/ч при удельной мощности $0,186 \text{ кВт/(ч}\cdot\text{м}^2)$ и к снижению скорости хода до 7-и узлов. Для обеспечения бытовых нужд яхты требуется дополнительная энергия и солнечные батареи или снижение мощности питания главных электродвигателей. В данном проекте стоимость 1 м^2 панелей солнечных батарей и систем электропитания составила около 1000 € с общей стоимостью 80 тыс. € . При эффективном использовании системы в среднем до $\frac{3}{4}$ длительности года в 365 суток по 12 часов в сутки общий эквивалент мощности ΣN_c , составит величину(4):

$$\Sigma N_c = 1,5(\text{Вт} / \text{час}) \times 12(\text{часов} / \text{сутки}) \times \frac{3}{4} \times 365(\text{суток}) = 49(\text{МВт}). \quad (4)$$

Солнечные батареи выполняют на всех жестких парусах судов будущего [6, 8, 15]. При этом максимально используют все возможные площади для их установки (рис.11), однако их мощность не превышает $5 - 10 \%$ мощности базовых судовых ДВС в $5-20 \text{ МВт}$. Однако большой недостаток для сухогрузов (рис. 11) – возможность сильного загрязнения солнечных батарей при погрузке и разгрузке сыпучих грузов, что требует их помывки с дополнительными затратами на ее выполнение и затягивает время стоянки судна в порту. Периодической помывки требуют солнечные батареи и на других судах их установки.

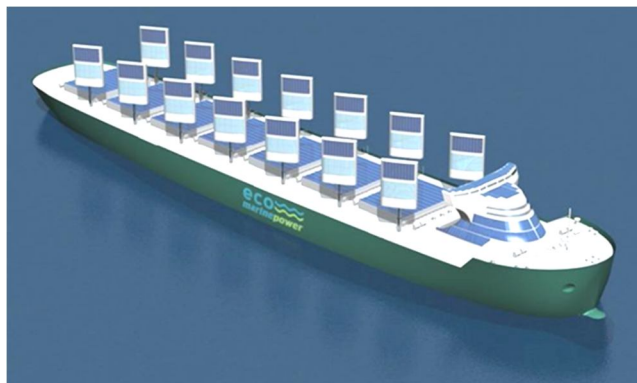


Рисунок 11 – Усовершенствованный проект судна *eco marinepower* (Япония)

Технико-экономический анализ гидроволновых судовых энергетических систем. В работе [3] гидроволновая энергетика для судов признана недоступной. Однако в работе [19] проведен анализ и показан наиболее целесообразный вариант ее реализации

в системах маятникового типа (рис. 12), защищенных патентом Российской Федерации на изобретение [20].

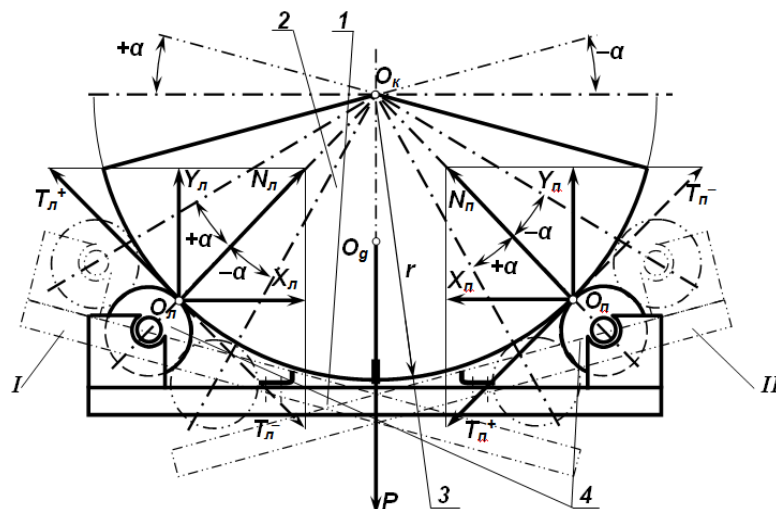


Рисунок 12 – Схема установки грузового сектора на опорные ролики в трюме судна и система действия сил в гидроволновой энергетической установке (Россия – Украина)

Перевозимый в трюмах корпуса 1 судна груз 2 размещен в сегментах с дуговым основанием 3, которые свободно установлены на опорные ролики 4, что придает грузу устойчивую ориентацию к центру Земли. Поэтому при наклоне корпуса судна волнами в положения I и II груз сохраняет свое положение, а опорные ролики перекачиваются по его дуговой поверхности. Далее их вращение напрямую или через реверсивные зубчатые передачи с обгонными муфтами передается валам роторов электрогенераторов (во 2-м случае сохраняется одно и тоже направление вращения роторов электрогенераторов, что облегчает условия их эксплуатации).

Энергетический потенциал системы определяется весом груза $P = gm$, радиусом r дугового сектора и углом $\pm\alpha$ (рад) его качания по зависимости (5):

$$E_G = 2 gm r \alpha \text{ (Дж)}. \quad (5)$$

Мощность системы зависит от периода качки судна волнами, которая зависит от их высоты и размеров корпуса судна, качаемого волнами. При минимальной высоте волн $h = 1$ м период качки составляет величину $\tau = 2,61$ с [13], тогда при длине корпуса $L = 150$ м и радиусе дугового сектора качания грузов $r = 10$ м, удельная мощность в расчете на 1000 т массы m груза составит величину (6):

$$N_g = \frac{gr}{\tau} 2 \arctg \left(\frac{h}{0,5L} \right) m = \frac{9,81 \times 10}{2,61} 2 \times \arctg \left(\frac{1}{75} \right) m = 1 \text{ (МВм / час)}. \quad (6)$$

При массе перевозимых грузов 10 тыс.т. (что сравнимо с грузоподъемностью яхты «А») и эффективном использовании системы в среднем до $\frac{3}{4}$ длительности рейса в 250 суток по 24 часов в сутки общий эквивалент мощности ΣN_G составит величину (7):

$$\Sigma N_G = 1 \times 10 \text{ (МВм / час)} \times 24 \text{ (часа / сутки)} \times \frac{3}{4} \times 250 \text{ (сутки)} = 45000 \text{ (МВм)}. \quad (7)$$





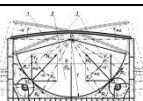
Таким образом, мощность гидроволновой системы превышает мощность любых других нетрадиционных энергетических систем и она применима для судов, дедвейтом до 40 тыс. т, поскольку при больших размерах – эффект качки судна уменьшается.

Расходы на изготовление такой системы можно оценить условно в 20 млн. € (более точный расчет возможен для конкретного варианта изготовления судна).

Учитывая, что для выработки 1 кВт энергии судовые электрогенераторы расходуют около 0,18 кг дизельного топлива или 0,19 кг мазута, то его годовая экономия

в пределах мощностей (1)...(3), (7) – составит величину ΔQ , тогда при нынешней стоимости 1 кг дизельного топлива около 0,35 € и мазута около 0,2 €, срок окупаемости проектов составит величину ΔT , приведенную в табл. 2. При этом учитывали, что расходы на эксплуатацию и обслуживание систем составляют около 10% от их исходной стоимости.

Таблица 2 – Соотношение затрат и сроков окупаемости основных нетрадиционных судовых энергетических систем

Вариант	Эквивалент мощности (тыс. кВт)	Расходы на систему (тыс. €)	Экономия топлива ΔQ (тыс. кг)	Стоимость 1 кг топлива (€/кг)	Экономия затрат (тыс. €)	Срок окупаемости ΔT (годы)
	22000	20000×1.1= =22000	3240	0.35	1134	19,4
			3420	0,2	684	32,2
	1000	700×1.1= = 770	180	0.35	63	12,1
			190	0,2	38	20,2
	1750	720×1.1= = 792	298	0.35	104	7,6
			332	0,2	66	12,0
	49	80×1.1= = 88	14,4	0.35	5	17,6
			15,2	0,2	3	29,3
	45000	20000×1.1= =22000	8100	0.35	2835	7,8
			8550	0,2	1710	12,9

Наименьшие сроки окупаемости 7,8 и 7,6 года имеют гидроволновые и ветряные системы встречного принципа действия, Однако следует учесть, что проекты со сроком окупаемости свыше 5-и лет считаются экономически нецелесообразными, поэтому в настоящее время экологически чистые проекты судов [6–8, 15] малопривлекательны для судовладельцев и частного капитала, и практически сводятся к дотационным. Поскольку решение проблемы применения альтернативной энергетики на транспортном флоте является важной и актуальной задачей для всего общества, необходимо ее решение.

Общие выводы по работе:

1. На судах транспортного флота до 20% энергии могут вырабатывать ветряные и солнечные энергетические системы, использующие бросовую природную энергию, отказ от которой можно считать расточительством.
2. Гидроволновая энергетика обладает наибольшим энергетическим потенциалом по сравнению с другими судовыми альтернативными энергетическими системами и может полностью заменить судовые ДВС.
3. При современных ценах на топливо, около 200 € за 1 т, экологически чистые проекты судов сводятся к дотационным, поэтому нынешнее резкое снижение цен на нефть чревато отсутствием прогресса в их создании и внедрении, что в угоду ситуационных интересов некоторых стран мира увеличивает угрозу усиления парникового эффекта, опасного для всех стран мира.
4. Экологически чистые проекты судов на базе альтернативной энергетики могут быть экономически привлекательными для судовладельцев и частного капитала при снижении их себестоимости в 2 раза и при повышении стоимости топлива до 450 € за 1 т, что следует учитывать в ценовой политике и в объемах добычи нефти.
5. Для развития судовой альтернативной энергетики, позволяющей снизить выбросы парниковых газов и уменьшить расход топлива на 15...20 %, следует учесть, как

важное направление развития в решениях будущих международных договоров по экологии и охране окружающей среды и предусмотреть выделение дотационных средств на создание рассмотренных систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Настасенко В. А. Судовая альтернативная энергетика и реалии ее применения в современных условиях / В. А. Настасенко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (Warszawa, Polska). – 2016. – № 3 (7) – С. 36–47.
2. Кемпбел К. Грядущий нефтяной кризис / К. Кемпбел. – М. : Группа независимых издателей, 1997. – 210 с.
3. Шурляк В. К. Применение альтернативных видов энергии и альтернативных топлив на морских судах / В. К. Шурляк // СПГ как альтернативное топливо для морских судов : материалы Всероссийского Семинара – С-Петербург : ГМА им. Макарова, 2012. – 24 с. – Режим доступа: www.korabel.ru/filemanager/OTHER/0/0/3.pdf
4. COP-21. Парижский Всемирный Саммит 2015 года по проблемам климата [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cop21/
5. Месяц Г. А., Прохоров М.Д. Водородная энергетика и топливные элементы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.vivos_voco
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ecomarinepower.com/en/energysail>
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nyk.com/english/release/31/NE_090422.html
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.youtube.com/watch?v=wAIAc4vU4IM>
9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ruyachts.com/journal/sept22-2015-novyie-foto-sailing-yacht-a-andreya-melnichenko>
10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.podparusami.com/sailing-ships/royal-clipper-history-tech/>
11. Морской энциклопедический справочник. В 2-х томах. Т. 2. / Под ред. Н. Н. Исанина – Л. : Судостроение, 1986. – 426 с.
12. Настасенко В. О. Суднова альтернативна енергетика та особливості охорони праці і безпеки її експлуатації / В. О. Настасенко, В. А. Євдокимова // Вісник Херсонського національного технічного університету – Херсон : ХНТУ, 2014. – Вип. 1 (48). – С. 77–82.
13. Агеев В. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : курс лекций / В. А. Агеев. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та. Кафедра теплоэнергетических систем, 2004. – 343 с.
14. Zeppelin SkySails, Sales and Service – Germany, Hamburg, 2007 – 32 p.
15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.CargoXpress.eu
16. Заявка на патент Украины на изобретение № 201405695 Спосіб установки на судні системи вітрових генераторів барабанного типу. Від 25.05.2014 р. Авт. і заявник Настасенко В.О. Рішення про видачу патенту від 01.09.2016 р.
17. SOLAR TURANOR [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://alternathistory.org.ua/turanor-planet-solar-samoe-bolshoe-v-mire-sudno-na-solnechnikh-batareyakh>
18. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.solarwave-yachts.com
19. Настасенко В.О. Блах І. В. Сучасний стан судової гідрохвильової енергетики та його аналіз // Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. –Херсон : ХДМА, 2015. – № 1 (12). – С. 58–65.

20. Заявка на патент Российской Федерации на изобретение 2014103004/20 от 28.01.14. Судно с гидроволновой энергетической установкой Автор и заявитель. Настасенко В.А. Решение о выдаче патента от 20.07.16.

REFERENCES

1. Nastasenko V. A. Sudovaya aljternativnaya ehnergetika i realii ee primeneniya v sovremennikh usloviyakh / V. A. Nastasenko // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (Warszawa, Polska). – 2016. – № 3 (7) – S. 36–47.
2. Kempbel K. Gryaduthiyj neftyanoyj krizi / K. Kempbel. – M. : Gruppya nezavisimihkh izdateleyj, 1997. – 210 s.
3. Shurlyak V. K. Primenenie aljternativnihkh vidov ehnergii i aljternativnihkh topliv na morskikh sudakh / V. K. Shurlyak // SPG kak aljternativnoe toplivo dlya morskikh sudov : materialih Vserossijskogo Seminara – S-Peterburg : GMA im. Makarova, 2012. – 24 s. – Rezhim dospupa: www.korabel.ru/filemanoger/OTHER/0/0/3.pdf
4. SOR-21. Parizhskiyj Vsemirniyj Sammit 2015 goda po problemam klimata [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cop21/
5. Mesyac G. A., Prokhorov M.D. Vodorodnaya ehnergetika i toplivnihe ehlementih. [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : www.vivos_voco
6. [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.ecomarinepower.com/en/energysail>
7. [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.nyk.com/english/release/31/NE_090422.html
8. [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://www.youtube.com/watch?v=wAIAC4vU4IM>
9. [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://ruyachts.com/journal/sept22-2015-novyie-foto-sailing-yacht-a-andreya-melnichenko>
10. [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.podparusami.com/sailing-ships/royal-clipper-history-tech/>
11. Morskoyj ehnciklopedicheskiyj spravochnik. V 2-kh tomakh. T. 2. / Pod red. N. N. Isanina – L. : Sudostroenie, 1986. – 426 s.
12. Nastasenko V. O. Sudnova aljternativna energetika ta osoblivosti okhoroni praci i bezpeki її ekspluatacii / V. O. Nastasenko, V. A. Cvdokimova // Visnik Khersonsjkogo nacionaljnogo tekhnichnogo universitetu – Kherson : KhNTU, 2014. – Vip. 1 (48). – S. 77–82.
13. Ageev V. A. Netradicionnihe i vozobnovlyaemihe istochniki ehnergii : kurs lekcijj / V. A. Ageev. – L. : Izd-vo Leningr. un-ta. Kafedra teploehnergeticheskikh sistem, 2004. – 343 s.
14. Zeppelin SkySails, Sales and Servise – Germany, Hamburg, 2007 – 32 p.
15. [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : www.CargoXpress.eu
16. Zayavka na patent Ukrainih na izobretenie № 201405695 Sposib ustanovki na sudni sistemi vitrovikh generatoriv barabannogo tipu. Vid 25.05.2014 r. Avt. i zayavnik Nastasenko V.O. Rishennya pro vidachu patentu vid 01.09.2016 r.
17. SOLAR TURANOR [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://alternathistory.org.ua/turanor-planet-solar-samoe-bolshoe-v-mire-sudno-na-solnechnikh-batareyakh>
18. [Ehlektronniyj resurs]. – Rezhim dostupa : www.solarwave-yachts.com
19. Nastasenko V.O. Blakh I. V. Suchasniyj stan sudnovoi gidrokhviljivoi energetiki ta yjogo analiz // Naukoviyj visnik Khersonsjkoї derzhavnoї morskoї akademii : naukoviyj zhurnal. –Kherson : KhDMA, 2015. – № 1 (12). – S. 58–65.
20. Zayavka na patent Rossijskoyj Federacii na izobretenie 2014103004/20 ot 28.01.14. Sudno s gidrovolnovoyj ehnergeticheskoyj ustanovkoyj Avtor i zayavitelj. Nastasenko V.A. Reshenie o vihdache patenta ot 20.07.16.

Настасенко В. О. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ СУДНОВОЇ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ І МОЖЛИВОСТІ ЇЇ РОЗВИТКУ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

У роботі проведений аналіз основних шкідливих викидів при спалюванні в суднових ДВС традиційних палив на базі нафти і газу. Показано, що їх зменшення можливе при переході на водневе паливо і при заміні палива альтернативною енергетикою, серед якої для транспортних суден використовують попутні вітрильні і зустрічні барабанні вітряні енергетичні системи, а також сонячні фотоелектричні та гідрохвильові системи. Однак їх застосування при вартості суднового палива <450 € стає дотаційним і непривабливим для приватного капіталу, що стримує можливості для розвитку і застосування суднової альтернативної енергетики, тому потрібний перегляд цінової політики у сфері палив на базі нафти і газу.

Ключові слова: суднова вітряна, сонячна та гідрохвильова енергетика.

Nastasenko V A. TECHNIQUES-ECONOMICAL ANALYSIS OF SHIP ALTERNATIVE POWER AND POSSIBILITIES OF ITS DEVELOPMENT IN MODERN TERMS

The analysis of basic harmful emissions during incineration in a ship DVS of traditional fuels on the basis of oil and gas is conducted. It is shown that their diminishing is possible in transition on a hydrogen fuel and while replacement of fuel alternative energy, among which the passing wind-driven and drum wind-driven power systems, sun photo-electric and hydro wave power systems are used for transport ships. However their application at the cost of ship fuel 450 € becomes subsidized and unattractive for a private capital, that restrains possibilities of development and application of ship alternative energy, that's why there's a need of the price policy review in the field of fuels on the basis of oil and gas.

Keywords: vessel wind, solar and hydro wave power, technical and economical indexes.

© Настасенко В. О.

Статтю прийнято
до редакції 05.04.17

УДК 656.61.052

РАСЧЕТ КРЕНА СУДНА НА ЦИРКУЛЯЦИИ

Пипченко А. Д., к.т.н., докторант Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: nav.researches@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6878-0619

В данной работе предложен метод расчета крена судна, возникающего при маневрировании. Дифференциальное уравнение второго порядка для бортовых наклонов было получено в виде комбинации независимых от частоты составляющих уравнения бортовой качки, нелинейного сопротивления и гидродинамических моментов на руле и корпусе, действующих относительно продольной оси. Полученные результаты могут быть использованы в качестве дополнения к математическим моделям движения судна, в которых первоначально не учитывается крен.

Ключевые слова: маневрирование судна, математическая модель маневрирования, крен при повороте.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами. Моделирование движения судна при маневрировании является одним из наиболее важных аспектов при исследовании проблем, связанных с судовождением. В зависимости от решаемых задач используются модели различной сложности. В подавляющем большинстве случаев нелинейную динамику движения судна описывают тремя дифференциальными уравнениями движения судна на плоскости. Однако для ряда судов с высоко расположенным центром тяжести, таких как контейнеровозы, го-го и другие, важным параметром также является крен судна на циркуляции. Последний далеко не всегда учитывается.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В основном, при разработке математических моделей движения судна крен на циркуляции не учитывается. Причиной этому являются попытки упростить нелинейную модель за счет исключения менее значимых степеней свободы из системы уравнений.

Однако согласно исследованиям группы японских ученых, проведенным в 2015 году в опытовом бассейне [4], остойчивость судна и связанные с ней бортовые наклоны значительным образом влияют на параметры поворотливости.

Методы определения крена судна при повороте упоминаются в работах [1, 4, 7]. В основном, предлагается определять угол бортового наклона по эмпирической модели, полученной в результате экспериментов в опытовом бассейне. Однако, в таком случае не представляется возможным определить крен судна на циркуляции без проведения соответствующего эксперимента.

В работах [5, 11] приведены теория и методы как построения моделей маневрирования судна, так и моделей качки. В современной практике расчетов динамики судна эти математические модели, в основном, принято разделять. При этом, в работе [1] приведена теоретическая база, позволяющая объединить в единую систему колебательные движения, вызванные волнением, и маневрирование, имеющее нелинейный характер.

Формулирование целей статьи (постановка задачи). Целью данного исследования является разработка метода определения крена судна на циркуляции для существующих математических моделей движения, в которые уравнение бортовых наклонов изначально не включено.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов. Математическая модель маневрирования судна с учетом бортовых наклонов, базируясь на модели движения на плоскости из работы [9] с добавлением уравнения колебаний относительно продольной оси будет, выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_{11})\dot{u}_G - (m + m_{22})v_G r_G &= X \\ (m + m_{22})\dot{v}_G + (m + m_{11})u_G r_G &= Y \\ (I_{44} + J_{44})\dot{p}_G &= K \\ (I_{66} + J_{66})\dot{r}_G &= N - x_G Y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где m – массовое водоизмещение судна; m_{11} , m_{22} – присоединенные массы, I_{44} , I_{66} – моменты инерции, J_{44} , J_{66} – присоединенные моменты инерции, u_G , v_G , p_G , r_G – продольная и поперечная составляющие поступательной скорости и угловые скорости относительно поперечной и вертикальной осей относительно центра тяжести судна соответственно; X , Y , K , N – гидродинамические силы и моменты, действующие на судно.

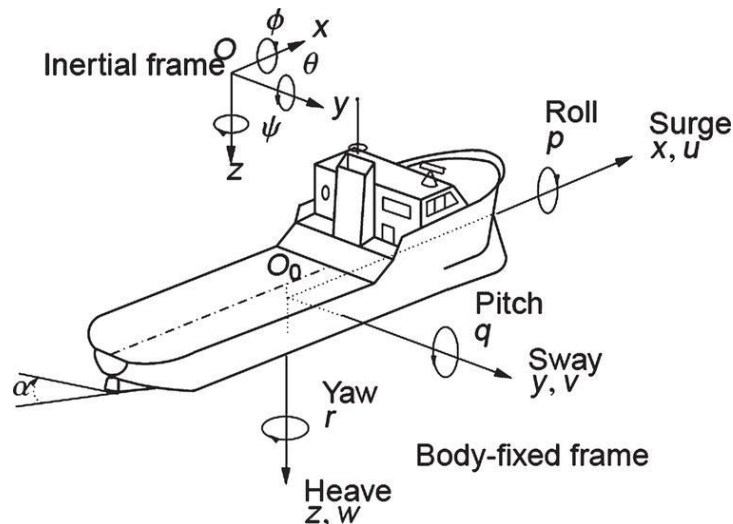


Рисунок 1 – Системы координат для моделирования движения судна

В развернутом виде гидродинамические силы и моменты представим как:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P + X_W \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_P + Y_W + Y_{BT} \\ K &= K_H + K_R + K_W + K_{BT} \\ N &= N_H + N_R + N_P + N_W + N_{BT} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где H – корпус; R – руль; P – винт; W – ветер; BT – носовое подруливающее устройство.

Силы и моменты, выражающие движение на плоскости, примем в форме, предложенной Йошимуро [9].

Третье уравнение (уравнение для крена судна) системы (1) будем рассматривать далее отдельно. Коэффициенты гидродинамических сил на корпусе согласно работе [9] рассчитываются полуэмпирическим методом на основе аппроксимации результатов испытаний в опытовом бассейне без выделения влияния крена и скорости бортовых колебаний в отдельную группу коэффициентов. Таким образом, целесообразно будет предположить, что влияние бортовых колебаний на маневренность судна на тихой воде косвенно учтено в результате аппроксимации.

На основе [5] уравнение бортовых колебаний запишем как:

$$\begin{aligned} &a_{42} \cdot \dot{v}_G + b_{42} \cdot v_G + \\ &(I_{kk} + a_{44})\dot{p}_G + b_{44} \cdot p_G + c_{44} \cdot \varphi + \\ &+ a_{46} \cdot \dot{r}_G + b_{46} \cdot r_G = K, \end{aligned} \quad (3)$$

где a – коэффициенты инерционных сил; b – коэффициенты демпфирующих сил; c – коэффициент восстанавливающих сил, K – суммарный кренящий момент; φ – угол

крена; индексы 1,2,3 – соответствуют линейным перемещениям по продольной, поперечной и вертикальной осям; индексы 4,5,6 – соответствуют вращательным движениям относительно продольной (крен), поперечной (дифферент) и вертикальной (рыскание) осей судна.

В отличие от бортовой качки на волнении, наклон судна во время маневра не имеет периодического характера и также, как и угловая скорость в процессе маневра, доходит до максимума, а затем снижается до устойчивого значения.

Согласно работе [5] коэффициенты демпфирующих сил при кажущейся частоте волнения, близкой к нулю, также равны нулю, кроме коэффициента b_{46} , который зависит от присоединённых масс и коэффициента b_{44v} , выражающего нелинейное вязкостное демпфирование.

Основываясь на работе [5], коэффициенты a_{42} , a_{44} , a_{46} , b_{46} с учетом преобразований, связанных с тем, что кажущаяся частота волнения равна нулю, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{42} &= m_{42} + OG \cdot m_{22}; \\ a_{44} &= m_{44} + m_{42} + OG \cdot (m_{24} + OG \cdot m_{22}); \\ a_{46} &= (m_{42} + OG \cdot m_{22}) \cdot L; \\ b_{46} &= -u \cdot (m_{42} + OG \cdot m_{22}). \end{aligned}$$

где m_{ii} – коэффициенты присоединенных масс, которые можно определить методами, описанными в работах [5, 8, 9, 11]; OG – длина перпендикуляра, опущенного из центра тяжести на плоскость ватерлинии; L – длина судна между перпендикулярами; u – поступательная скорость судна.

Коэффициент b_{44v} можно определить методом Икеда [2], исключив при этом составляющие зависимые от кажущейся частоты волнения:

$$b_{44v} = b_{44f}(\varphi_a, \omega_n, u) + b_{44l}(u), \quad (4)$$

где b_{44f} – коэффициент трения, b_{44l} – подъемный коэффициент, φ_a – амплитудное значение бортовой качки; ω_n – собственная частота бортовых колебаний.

Коэффициенты b_{44f} , b_{44l} также зависят и от геометрических параметров погруженной части корпуса, однако при моделировании в определенном состоянии загрузки их можно считать постоянными.

Натуральную частоту колебаний будем определять из периода бортовой качки как:

$$\omega_n = \frac{1}{T_\varphi}, \quad (5)$$

В свою очередь, период качки можно определить по эмпирической формуле ИМО, приведенной в [3]:

$$T_\varphi = \frac{2 \cdot C \cdot B}{\sqrt{GM}}; \quad (6)$$

$$C = 0.373 + 0.023 \left(\frac{B}{d} \right) - 0.043 \left(\frac{L}{100} \right),$$

где B – ширина судна, d – осадка, GM – метацентрическая высота.

Однако для контейнеровозов класса пост-панамакс следует использовать формулу, рекомендуемую в [10], ввиду наличия больших погрешностей при вычислении периода качки по обобщенной формуле:

$$T_{\varphi} = 2\pi \sqrt{\frac{R^2}{g \cdot GM}} \quad (7)$$

где R – радиус инерции судна.

Восстанавливающий момент в уравнении выражен как $c_{44} \cdot \varphi$. В свою очередь:

$$c_{44} = GM \cdot g \cdot m, \quad (8)$$

где m – масса судна, g – ускорение свободного падения.

Формула (8) справедлива в линейном диапазоне углов крена. Для больших углов крена ($>15^\circ$) более корректным будет расчёт восстанавливающего момента в виде:

$$K_{\varphi} = gm \cdot l(\varphi), \quad (9)$$

где $l(\varphi)$ – плечо статической остойчивости.

В результате дифференциальное уравнение бортовой качки можно записать в виде:

$$(I_{kk} + J_{kk}) \dot{p}_G = a_{42} \cdot \dot{v}_G - a_{46} \cdot \dot{r}_G - b_{46} \cdot r_G - b_{44v} \cdot p_G - c_{44} \cdot \varphi - K_R - K_H, \quad (10)$$

где K_R – кренящий момент под действием рулевого устройства; K_H – кренящий гидродинамический момент.

$$K_R = Y_R \cdot (z_G - z_R); K_H = Y_H (z_G - z_H),$$

где Y_R – боковая сила, создаваемая на перекладке руля; Y_H – боковая сила сопротивления движению. z_R – аппликата центра эффективной площади руля; z_H – аппликата центра погруженной части корпуса.

Одним из аргументов функции является амплитуда колебаний φ_a . Так как судно не подвергается качке, а испытывает единоразовое наклонение, фазу можно считать равной текущему значению крена. В таком случае расчетная кривая бортового наклонения в повороте будет выглядеть, как показано на рис. 2.

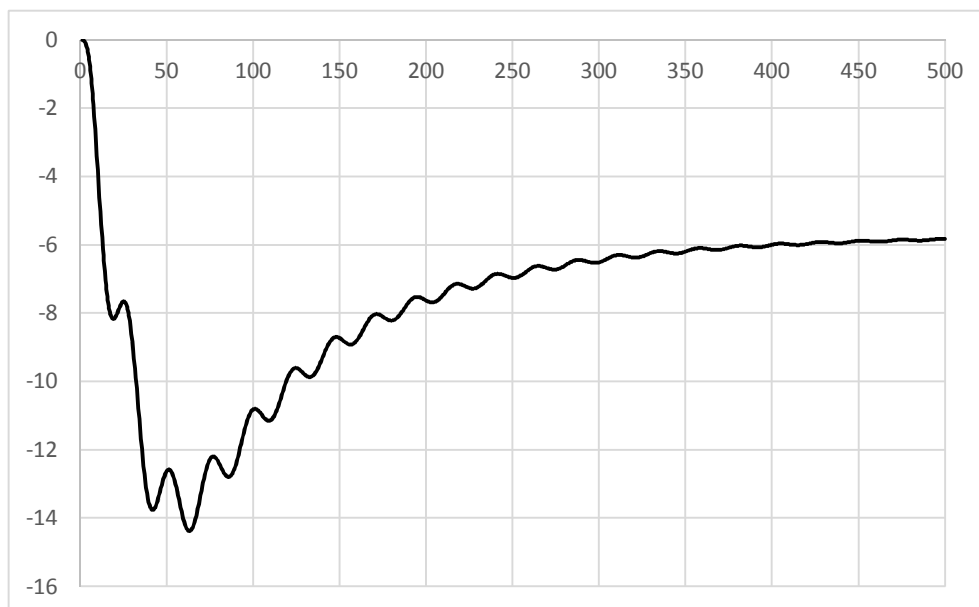


Рисунок 2 – Наклонение судна φ ($^\circ$) в повороте при перекладке руля 35° с переменной амплитудой колебаний

Однако, в реальных условиях при отсутствии внешних возмущений данная кривая будет гладкой. Для того чтобы исключить колебания более высокого порядка из результатов расчетов, присвоим значению φ_a фиксированное значение, равное максимальному углу наклонения при испытаниях, в нашем случае 20° .

С учетом последнего можно получить результат, отображенный на рис. 3.

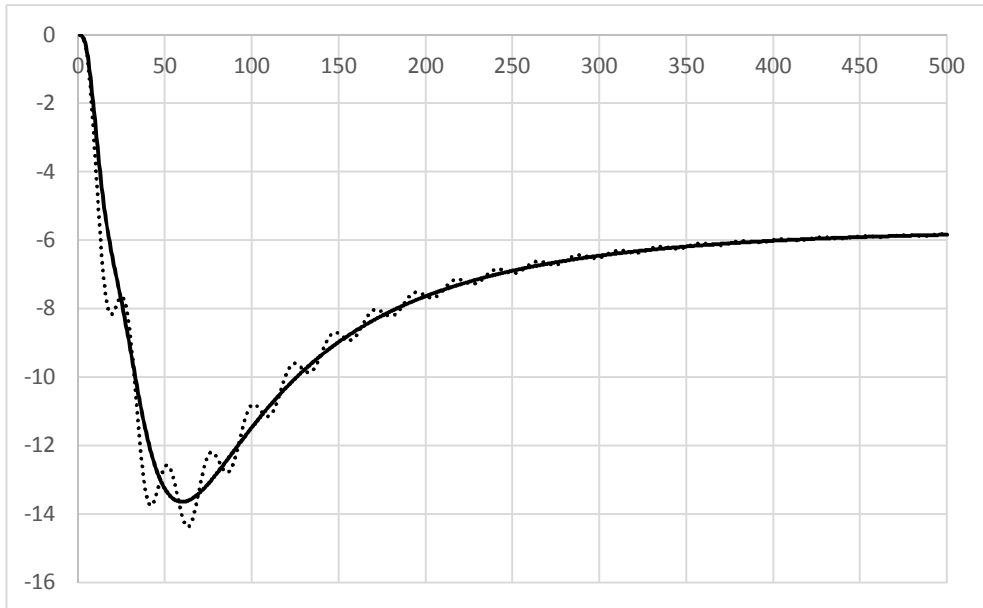


Рисунок 3 – Наклонение судна φ ($^{\circ}$) в повороте при перекладке руля 35°

Промоделировав маневры циркуляции с различными углами перекладки руля были получены кривые бортового наклонения судна, приведенные на рис. 4.

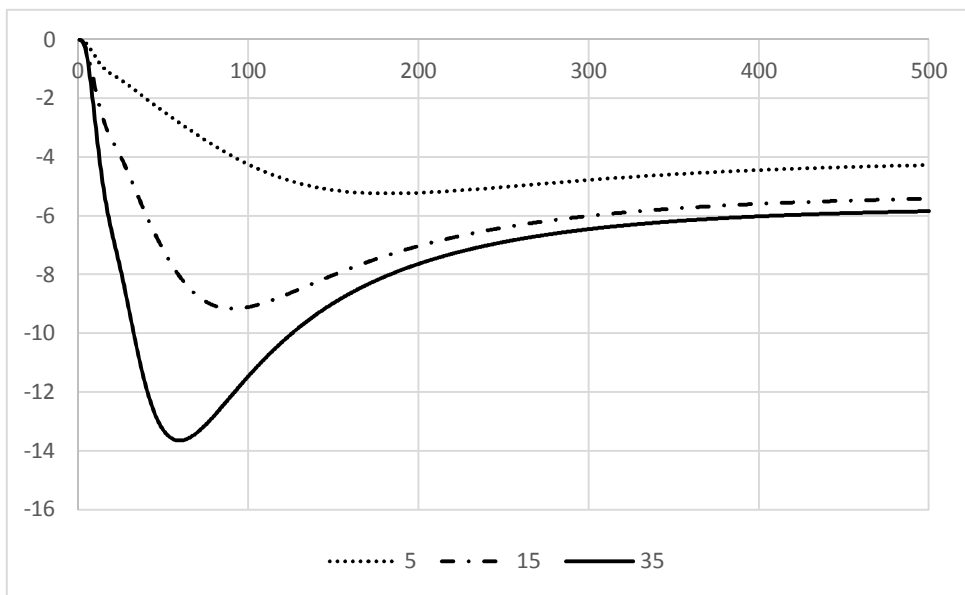


Рисунок 4 – Расчетные кривые наклонения судна в повороте при перекладках руля 5, 15 и 35°

Расчетные траектория и параметры движения контейнеровоза класса панамакс при перекладке руля «право на борт» с начальной скоростью 24 узла приведены на рис. 5.

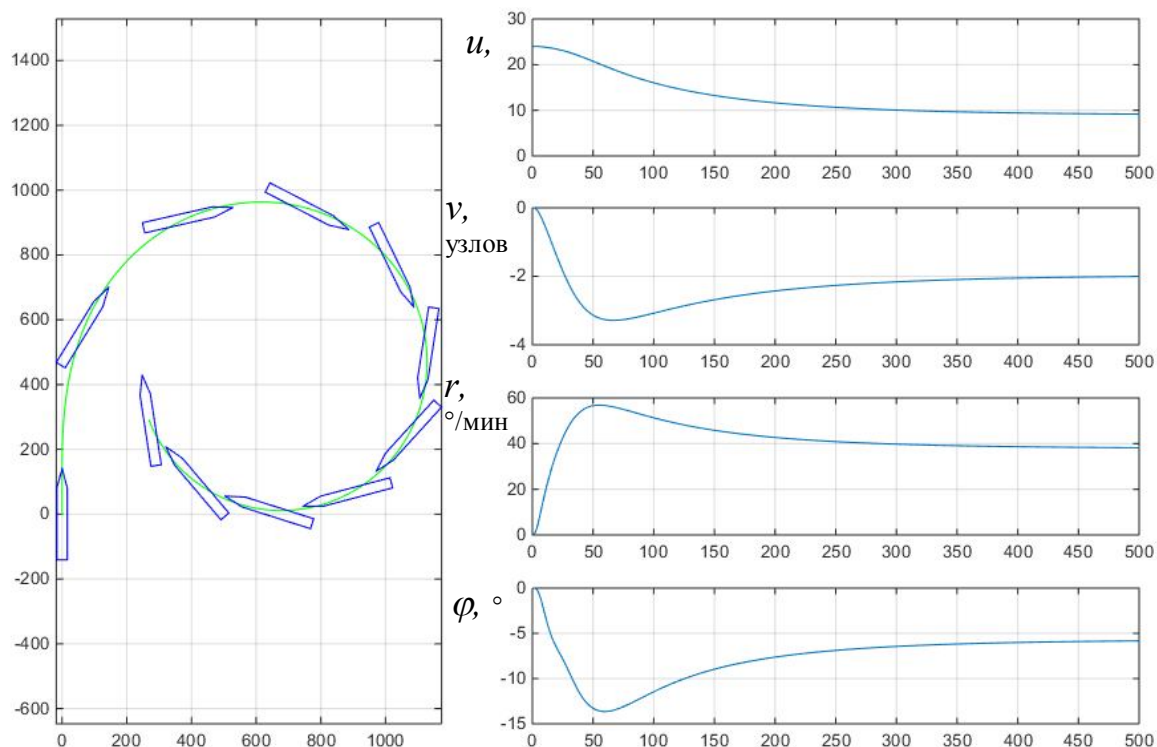


Рисунок 5 – Расчетные параметры циркуляции контейнеровоза класса панамакс

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.

В результате проведенного исследования был разработан метод расчета крена судна на циркуляции. Предложено дифференциальное уравнение бортовых наклонений второго порядка, которое может быть добавлено к стандартной модели маневрирования судна на плоскости с целью учета крена на циркуляции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fossen T. I. Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles / T. I. Fossen. – Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002. – 570 p.
2. Ikeda Y. A Prediction Method for Ship Rolling. Technical Report 00405 / Ikeda, Y., Himeno, Y., and Tanaka, N. // Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, Japan, 1978.
3. IMO Code on Intact Stability (IS), 2009.
4. Investigation of effect of roll motion on manoeuvrability using 4-dof mathematical model / Fukui Y., Yoshimura Y., Yano H., Kondo M. // Proceedings of MARIM-2015, 2015.
5. Journée J.M.J. Theoretical Manual of Strip Theory Program «SEAWAY for Windows». Report 1370. / J.M.J. Journée, L.J.M. Adegeest. – TU Delft/AMARCON, 2003. – 336 p.
6. Kijima K. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics / Kijima K., Tanaka S. Furukawa, Y. and Hori T. // Proc. of MARSIM-93, Vol.1, 1993. – Pp.285–294.
7. Perez T. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. (Technical Report) / T. Perez, M. Blanke. – DTU Technical University of Denmark, 2003. – 22 p.
8. Tasai F. Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface / Technical report, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan. Vol. IX, No 35, 1961.
9. Yasukawa H. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions / Yasukawa H., Yoshimura Y. // Journal of Marine Science & Technology. – 2015. – Pp. 37–52.

10. Милетин А. В. Расчет периода качки контейнеровозов // Судовождение : Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 24. – Одесса : «ИздатИнформ», 2014. – С.116–122.
11. Справочник по теории корабля. В трех томах / [под ред. Я. И. Войткунского] – Л. : Судостроение, 1985.

REFERENCES

1. Fossen T. I. Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles / T. I. Fossen. – Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002. – 570 p.
2. Ikeda Y. A Prediction Method for Ship Rolling. Technical Report 00405 / Ikeda, Y., Himeno, Y., and Tanaka, N. // Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, Japan, 1978.
3. IMO Code on Intact Stability (IS), 2009.
4. Investigation of effect of roll motion on manoeuvrability using 4?dof mathematical model / Fukui Y., Yoshimura Y., Yano H., Kondo M. // Proceedings of MARIM-2015, 2015.
5. Journee J.M.J. Theoretical Manual of Strip Theory Program «SEAWAY for Windows». Report 1370. / J.M.J. Journee, L.J.M. Adegeest. – TU Delft/AMARCON, 2003. – 336 p.
6. Kijima K. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics / Kijima K., Tanaka S. Furukawa, Y. and Hori T. // Proc. of MARSIM-93, Vol.1, 1993. – Pp.285–294.
7. Perez T. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. (Technical Report) / T. Perez, M. Blanke. – DTU Technical University of Denmark, 2003. – 22 p.
8. Tasai F. Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface / Technical report, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan. Vol. IX, No 35, 1961.
9. Yasukawa H. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions / Yasukawa H., Yoshimura Y. // Journal of Marine Science & Technology. – 2015. – Pp. 37–52.
10. Miletin A. V. Raschet perioda kachki konteynerovozov // Sudovozhdenie : Sb. nauchn. trudov / ONMA, Vihp. 24. – Odessa : «IzdatInform», 2014. – S.116–122.
11. Spravochnik po teorii korablya. V trekh tomakh / [pod red. Ya. I. Voyjtkunskogo] – L.: Sudostroenie, 1985.

Пипченко А. Д. РАСЧЕТ КРЕНА СУДНА НА ЦИРКУЛЯЦИИ

В данной работе предложен метод расчета крена судна, возникающего при маневрировании. Дифференциальное уравнение второго порядка для бортовых наклонений было получено в виде комбинации независимых от частоты составляющих уравнения бортовой качки нелинейного сопротивления и гидродинамических моментов на руле и корпусе, действующих относительно продольной оси. Полученные результаты могут быть использованы в качестве дополнения к математическим моделям движения судна, в которых первоначально не учитывается крен.

Ключевые слова: маневрирование судна, математическая модель маневрирования, крен при повороте.

Pipchenko O. D. ESTIMATION OF VESSEL HEEL DUE TO TURNING

In this study an estimation method for vessel heeling due to turn has been proposed. A second order differential equation of rolling motion has been obtained as combination of frequency independent rolling motion coefficients basing on potential theory, empirical methods for roll viscous damping and transformation of transverse hydrodynamic forces into corresponding moments acting along the longitudinal axis. Obtained results can be used as an addition to mathematical models of ship motion, which originally do not include rolling.

Keywords: vessel maneuvering, mathematical model of maneuvering, heeling due to turn.

© Пипченко О. Д.

Статтю прийнято
до редакції 07.03.17

ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ВИТРАТ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Федоров А. І., аспірант кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: mr.fedorov.anton@mail.ru

В статті розглянуто питання оптимізації процесу складання вантажного плану судна – контейнеровозу. Проаналізовано існуючі дослідження в зазначеній предметній галузі та показано, що ключовою умовою зменшення економічних витрат при здійсненні контейнерних перевезень є раціональне формування вантажного плану судна. Визначено що процес складання вантажного плану контейнеровозу являє собою складну багатокритеріальну оптимізаційну задачу, розв'язання якої забезпечує підвищення економічних показників виконання рейсу. Показано, що при складанні оптимального вантажного плану судна необхідно враховувати низку обмежень, пов'язаних з послідовністю заходу судна в кожен з портів, кількістю вивантажених/завантажених в портах контейнерів, послідовності заходу в порти, строками доставки вантажів, дотриманням вимог збереження остійності судна. Запропоновано математичну модель формування вантажного плану контейнеровозу, що враховує особливості конструкції конкретного судна, обмеження пов'язані з послідовністю завантаження контейнерів, та дотриманням вимог остійності судна. Застосування запропонованої математичної моделі складання вантажного плану контейнеровозу дозволить знизити витрати часу на процеси завантаження/вивантаження в портах, і як наслідок, зменшенню економічних витрат на здійснення рейсів судна.

Ключові слова: контейнерні перевезення, вантажний план контейнеровозу, оптимізація вантажних операцій з контейнерами, зменшення економічних витрат при здійсненні контейнерних перевезень.

Вступ. Контейнерні перевезення – економічний і надійний спосіб транспортування великих партій товарів. Контейнерні вантажоперевезення є одним з найнадійніших способів транспортування вантажу, що дозволяє забезпечити товару високу безпеку. Перевезення вантажу у контейнерах має ряд переваг, головне з яких – відсутність перевантажень товару при зміні транспортного засобу. Завдяки цьому досягається значна економія коштів при можливості гнучкого і ефективного поєднання різних видів транспорту в процесі доставки вантажу. До переваг морських контейнерних перевезень також можна віднести низьку, в порівнянні з більшістю інших видів транспорту, собівартість перевезень, велику вантажопідйомність морських суден, що дозволяє перевозити значні партії вантажу а також практично необмежену пропускну здатність морських шляхів [1–5].

Перевезення різних промислових товарів і готових товарів широкого споживання в стандартних контейнерах 20-foot equivalent unit (TEU), поступово стає пріоритетним методом доставки вантажів, вибір якого обумовлений чотирма перевагами [10]:

- відсутністю необхідності працювати з вантажем безпосередньо, оскільки товари знаходяться в заплomboваному контейнері;
- економією при перевезеннях завдяки ефекту масштабу;
- зручністю і економією часу при поєднанні з іншими видами транспорту;
- швидкістю і своєчасністю доставки.

Разом з тим, при плануванні контейнерних перевезень часто виникають різні проблеми, пов'язані з раціональним розміщенням вантажу на судні, що забезпечує ефективність операцій навантаження розвантаження в портах маршруту, об'ємом і вагою вантажу, що перевозиться, а також з обмеженнями при розміщенні його в трюмах і на палубі, відповідним вимогам безпеки судна [11].

Актуальність дослідження. При здійсненні вантажних операцій на контейнеровозі вони доволі часто здійснюються за принципом «останній завантажений – перший вивантажений», що призводить до формування неоптимального вантажного плану судна. Побудова технологічно обумовлених ланцюжків завантаження – вивантаження контейнерів, особливо, якщо маршрут судна проходить через кілька портів, призводить до виникнення проблеми так званого «шифтінга», тобто нерациональних вантажних операцій

завантаження-вивантаження контейнерів на судно з метою вилучення лише потрібних в завданому порту контейнерів. Зазначені операції призводять не лише до зростання часу здійснення вантажних операцій, але й впливають на зміну параметрів остійності судна, тому повинні ретельно контролюватися [6–8]. Зменшення кількості «шифтінга» позитивно впливає на економічні показники перевезення контейнерних вантажів, тому являє собою актуальну наукову та практичну задачу сучасного судноводіння [9].

Метою дослідження є розробка математичної моделі завантаження судна-контейнеровозу, що забезпечує зменшення впливу шифтінга контейнерів, і як наслідок сприяє зниженню економічних витрат на виконання рейсу.

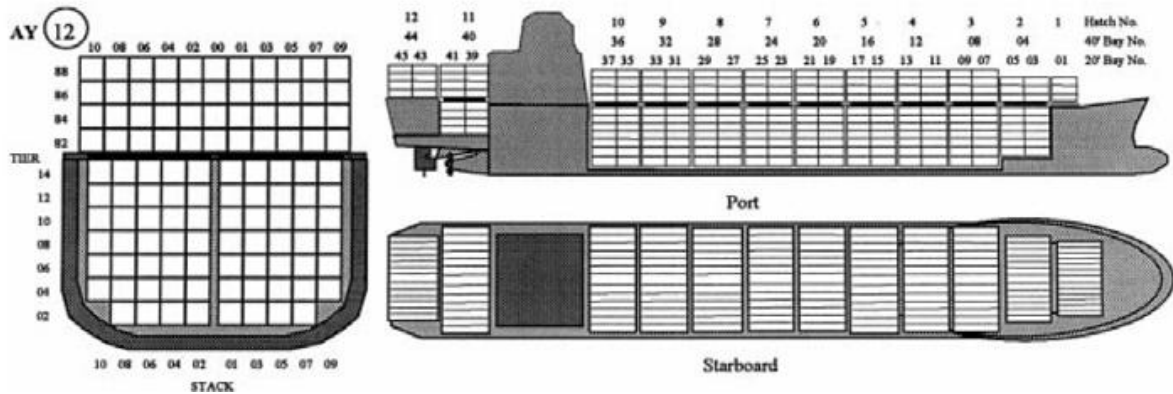


Рисунок 1 – Загальний вигляд судна-контейнеровозу та масиву контейнерів

Основна частина. Для побудови математичної моделі завантаження судна, без втрати структури оптимізаційної задачі розміщення контейнерів контейнеровозу в цілому, будемо вважати, що:

- 1) контейнерний масив контейнеровозу має прямокутний формат і може бути представлений матрицею з рядками ($r = 1, 2, \dots, R$), стовпчиками ($c = 1, 2, \dots, C$) і беями ($d = 1, 2, \dots, D$), з максимальною ємністю $R \times C \times D$ контейнерів;
- 2) контейнери на судні є однакового (або подвійного) розміру та ваги;
- 3) судно починає завантажуватися в порту № 1, куди воно приходить порожнім;
- 4) судно відвідує порти 2, 3, ..., N таким чином, що воно буде пустим в останньому порту, оскільки судно виконує рейс, в якому останній порт N є портом його відходу;
- 5) в кожному з портів $i = 2, \dots, N-1$, судно додатково може бути завантажено контейнерами, призначенням яких є порти $i + 1, \dots, N$;
- 6) контейнеровоз перевозить всі контейнери з порту в порт ніколи не досягаючи при цьому максимально можливої кількості контейнерів на судні.

Кількість контейнерів, що завантажуються в кожному із портів визначається транспортною матрицею $T(N-1) \times (N-1)$:

$$f(x) = \alpha \phi_1(x) + (1 - \alpha) \phi_2(y) \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, N-1, \quad j = i+1, \dots, N$$

$$\sum_{v=i+1}^j \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C \sum_{d=1}^D x_{ijv}(r, c, d) - \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C \sum_{d=1}^D x_{kij}(r, c, d) = T_{ij} \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, N-1, \quad j = i+1, \dots, N$$

$$\sum_{k=1}^i \sum_{j=i+1}^N \sum_{v=i+1}^j x_{kij}(r, c, d) = y_i(r, c, d) \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N-1, \quad r = 1, \dots, R \quad c = 1, \dots, C \quad d = 1, \dots, D$$

$$y_i(r, c, d) - y_{i+1}(r, c, d) \geq 0 \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N-1, \quad r = 1, \dots, R-1 \quad c = 1, \dots, C \quad d = 1, \dots, D$$

$$\sum_{i=1}^{j-1} \sum_{p=j}^N x_{ipj}(r,c,d) + \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{p=j+1}^N \sum_{v=i+1}^p x_{ipv}(r+1,c,d) \leq 1 \quad (5)$$

$$j = 2, \dots, N, \quad r = 1, \dots, R-1 \quad c = 1, \dots, C \quad d = 1, \dots, D$$

$$x_{ipv}(r,c,d) = 0 \text{ або } 1, \quad y_i(r,c,d) = 0 \text{ або } 1,$$

де бінарна змінна $x_{ipj}(r,c,d)$ визначається наступним чином: якщо в порту i , (r,c,d) є контейнер, адресатом якого є порт j і цей контейнер був переміщений в порту v , то змінна приймає значення 1; в іншому випадку вона приймає значення 0.

Термін місце (r,c,d) представляє являє собою рядок r , стовпець c для бей d контейнеровозу. Аналогічно, змінна $y_i(r,c,d)$ визначається наступним чином: якщо в порту i , місце (r,c,d) містить контейнер, то змінна приймає значення 1, в іншому випадку вона приймає значення 0.

Цільова функція (1) складається з двох складових: по-перше, загальна вартість переміщення контейнера i , друга, кількість шифтінгу в кожному порту. Передбачається, що для всіх портів, вартість шифтінгу контейнеру однакова і дорівнює одиниці.

Обмеження (2) пов'язане послідовністю з завантаження контейнера. Іншими словами, загальна кількість контейнерів на судні в порту повинна дорівнювати кількості контейнерів, які були завантажені в усіх портах $p = 1, 2, \dots, i$ мінус загальна кількість контейнерів, вивантажених у всіх портах $p = 1, 2, \dots, i$.

Обмеження (3) вимагає, щоб кожне місце (r,c,d) контейнеровоза завжди займало не більше одного контейнера.

Обмеження (4) пов'язано з фізичним зберіганням контейнерів на судні, і вимагає, щоб для кожного контейнера в рядку $r+1$, існував ще один контейнер у рядку r для всіх $r = 1, \dots, R-1$.

Обмеження (5) визначає, як контейнер може бути вивантажений з судна в порту j , таким чином, щоб, якщо контейнер займає позицію (r,c,d) в порту j , і він буде вивантажений, то не існує контейнерів вище нього, або такі контейнери вже були вивантажені у попередніх портах.

Приймаючи до уваги той факт, що сучасний контейнеровоз зазвичай перевозить кілька тисяч контейнерів, а вищенаведена оптимізаційна задача динамічного програмування є NP-повною, розв'язання її традиційними методами вкрай ускладнено. Для вирішення поставленої задачі найбільш доцільно застосовувати методи еволюційного програмування у вигляді генетичних алгоритмів.

При цьому також з'являється можливість її додаткового уточнення і ускладнення шляхом введення додаткових обмежень по вазі, розмірам контейнерів, та заздалегідь визначеним місцям розташування окремих груп контейнерів на судні, наприклад рефрижераторних.

Висновки. Застосування запропонованої оптимізаційної моделі для оптимізації процесу завантаження контейнеровозу з урахуванням процесу його заходження до кількох портів, дозволить скоротити час виконання вантажних операцій в портах шляхом зменшення кількості шифтінгу, та, як наслідок, знизити економічні витрати на виконання рейсу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоров А. И. Оптимизация морских контейнерных перевозок / А. И. Федоров. // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016)» (м. Херсон, 24–26 травня 2016). – Херсон : Видавництво ХДМА, 2016. – С. 47–48
2. Федоров А. И. Оптимизация ватажного плану контейнеровозу / А. И. Федоров // Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні

інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017)» (23-25 травня 2017). – Херсон : Видавництво ХДМА, 2017. – С. 13–14.

3. Федоров А. І. Зменшення шіфтингу контейнерів при складанні вантажного плану судна / А. І. Федоров // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика (БЖД-2017)». – Херсон : Видавництво ХДМА, 2017. – С. 183–184.

4. Ambrosino, D., Anghinolfi, D., Paolucci, M. and Sciomachen, A. (2010). 'An experimental comparison of different heuristics for the master bay plan problem', *Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6049*, 314–325.

5. Avriel, M., Penn, M. and Shpirer, N. (2000). 'Containership stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs', *Discrete Applied Mathematics, Vol. 103*, Nos. 1–3, 271–279.

6. Fan, L., Low, M.Y.H., Ying, H.S., Jing, H.W., Min, Z. and Aye, W.C. (2010). 'Stowage planning of large containership with tradeoff between crane workload balance and ship stability', *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computers Scientists, Vol. III*, 1–7.

7. Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. (2006). 'Multi-objective simultaneous stowage and loading planning for a container ship with container rehandle in yard stacks', *European Journal of Operational Research, Vol. 171, No. 3*, 373–389.

8. Sciomachen, A. and Tanfani, E. (2007). 'A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity', *European Journal of Operational Research, Vol. 183, No. 3*, pp.1433–1446.

9. Vacca, I., Bierlaire, M. and Salani, M. (2007). 'Optimization at container terminals: status, trends and perspectives', *7th Swiss Transportation Research Conference*, 1–21.

10. Wilson, I. and Roach, P.A. (1999). 'Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning', *Journal of Heuristics, Vol. 5, No. 4*, 403–418.

11. Wilson, I. and Roach, P.A. (2000). 'Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions', *Journal of the Operational Research Society, Vol. 51, No. 11*, 1248–1255.

REFERENCES

1. Fedorov, A. I. (2016). Optimizaciya morskikh konteyjernikh perevozok. *Materiali VIII Mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії «Suchasni informacijni ta innovacijni tekhnologii na transporti (MINTT-2016)»*. Kherson : Vidavnictvo KhDMA, 47–48.

2. Fedorov, A. I. (2017). Optimizaciya vatazhnogo planu konteyjnerovozu. *Materiali IX Mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії «Suchasni informacijni ta innovacijni tekhnologii na transporti (MINTT-2017)»*. Kherson : Vidavnictvo KhDMA, 13–14.

3. Fedorov, A. I. (2017). Zmenshennya shiftingu konteyjneriv pri skladanni vantazhnogo planu sudna. *Materiali IV Mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії «Bezpeka zhittediyalnosti na transporti i virobniectvi – osvita, nauka, praktika (BZhD-2017)»*. Kherson : Vidavnictvo KhDMA, 183–184.

4. Ambrosino, D., Anghinolfi, D., Paolucci, M. and Sciomachen, A. (2010). 'An experimental comparison of different heuristics for the master bay plan problem', *Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6049*, 314–325.

5. Avriel, M., Penn, M. and Shpirer, N. (2000). 'Containership stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs', *Discrete Applied Mathematics, Vol. 103*, Nos. 1–3, 271–279.

6. Fan, L., Low, M.Y.H., Ying, H.S., Jing, H.W., Min, Z. and Aye, W.C. (2010). 'Stowage planning of large containership with tradeoff between crane workload balance and ship stability', *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computers Scientists, Vol. III*, 1–7.

7. Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. (2006). 'Multi-objective simultaneous stowage and loading planning for a container ship with container rehandle in yard stacks', *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, No. 3, 373–389.

8. Sciomachen, A. and Tanfani, E. (2007). 'A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity', *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, No. 3, pp.1433–1446.

9. Vacca, I., Bierlaire, M. and Salani, M. (2007). 'Optimization at container terminals: status, trends and perspectives', *7th Swiss Transportation Research Conference*, 1–21.

10. Wilson, I. and Roach, P.A. (1999). 'Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning', *Journal of Heuristics*, Vol. 5, No. 4, 403–418.

11. Wilson, I. and Roach, P.A. (2000). 'Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions', *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 11, 1248–1255.

Федоров А. И. ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

В статье рассмотрены вопросы оптимизации процесса составления грузового плана судна - контейнеровоза. Проанализированы существующие исследования в данной предметной области и показано, что ключевым условием уменьшения экономических затрат при осуществлении контейнерных перевозок является рациональное формирование грузового плана судна. Определено, что процесс составления грузового плана контейнеровоза представляет собой сложную многокритериальную оптимизационную задачу, решение которой обеспечивает повышение экономических показателей выполнения рейса. Показано, что при составлении оптимального грузового плана судна необходимо учитывать ряд ограничений, связанных с последовательностью захода судна в каждый из портов, количеством выгруженных / загруженных в портах контейнеров, последовательности захода в порты, срокам доставки грузов, соблюдением требований сохранения остойчивости судна. Предложена математическая модель формирования грузового плана контейнеровоза, учитывающая особенности конструкции конкретного судна а также ограничения связанные с последовательностью загрузки контейнеров и соблюдением требований остойчивости судна. Применение предлагаемой математической модели составления грузового плана контейнеровоза позволит снизить затраты времени на процессы загрузки / выгрузки в портах, и как следствие, уменьшению экономических затрат на осуществление рейсов судна.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, грузовой план контейнеровоза, оптимизация грузовых операций с контейнерами, уменьшение экономических затрат при осуществлении контейнерных перевозок.

Fedorov A. I. WAYS OF REDUCTIONS OF ECONOMIC COSTS WHEN PERFORMING CONTAINER TRANSPORTATION

The article considers the issues of optimization of the process of drafting the cargo plan of the vessel - container vessel. The existing research in this subject area has been analyzed and it is shown that the key condition for reducing the economic costs of container transportation is the rational formation of the ship's cargo plan. It is determined that the process of compilation of cargo container plan is a complex multicriteria optimization problem, the solution of which provides an increase in the economic performance of the container transportation. It is shown that when compiling the optimal cargo plan of a vessel, it is necessary to take into account a number of restrictions connected with the sequence of the ship's approach to each port, the number of containers discharged/loaded at ports, the order of entering ports, delivery times, compliance with the requirements of maintaining the stability of the vessel. The mathematical model of formation of the cargo plan of the container carrier, taking into account the specifics of the design of a particular vessel, as well as the constraints associated with the loading sequence of the containers and the observance of the requirements of the stability of the vessel, is proposed. The application of the proposed mathematical model for the compilation of the containerized cargo plan will reduce the time costs for loading / unloading processes in the ports, and as a consequence, reduce the economic cost of the vessel's operations.

Keywords: container transportation, cargo plan, container transport, optimization of cargo operations with containers, reduction of economic costs when performing container transportations.

© Федоров А.И.

Статтю прийнято
до редакції 21.06.17

***РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОХОРОНА
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА***

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР КРИТЕРИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЛАБОПРОВОДЯЩИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАКРЫТЫЕ ОБЪЕМЫ

Кириллов О.Л., к.т.н., доцент кафедры энергетики, электротехники и физики Херсонского национального технического университета, e-mail: energetika@kntu.net.ua

В статье проведен анализ, исследование и выбор заряда Q в качестве критерия безопасности. В сравнении с другими критериями, например, потенциал φ и напряженность H , заряд является наиболее простым параметром для описания состояния электрической безопасности при заполнении нефтепродуктов в замкнутые объемы благодаря анализу уровня заряда в единице объема транспортируемой жидкости. Определены методы и дан анализ современных средств диагностирования при выявлении состояния опасного заряда в нефтепродукте, дан его простой анализ.

Ключевые слова: выбор заряда Q в качестве критерия безопасности, простой параметр описания состояния безопасности, заполнение нефтепродуктов в замкнутые объемы, анализ средств диагностирования, опасный заряд.

Введение. Эксперимент с получением результатов проведенных исследований процесса транспортирования слабопроводящих жидкостей (СПЖ) в замкнутые объемы в 60–70-е годы завершился в 1977 году. Группа по статистической электризации Лондонского института физики на симпозиуме «Критерий электростатического воспламенения» предложила в качестве критерия электростатической безопасности величину потенциала $\varphi \leq 35$ кВ, которая и была принята [1, 2]. Критерий представлял собою уровень безопасного потенциала поверхности СПЖ относительно стенок заполняемого объема, при котором не развиваются процессы зажигания или взрыва в паровоздушном пространстве над поверхностью заполняемой жидкости.

Результат анализа выбранного критерия не позволяет полностью понять механизм развития физического процесса создания поля, а лишь показывает связь заряда Q с потенциалом φ поверхности СПЖ [3], т.е. следствие результата накопления заряда в замкнутом объеме. Поэтому вопрос выбора критерия безопасности при транспортировке слабопроводящих жидкостей в закрытые объемы требует более детального рассмотрения.

Постановка задачи исследования. Обосновать и описать применение заряда Q в качестве нового критерия безопасности в процессе транспортирования слабопроводящих жидкостей в замкнутые объемы.

Цель исследования. Выбор нового критерия безопасности и нахождение взаимосвязи емкостных свойств заполняемого замкнутого объема с технологическими параметрами заполнения в процессе накопления энергии квазистатического поля.

Основная часть. Во время заполнения замкнутых объемов под действием гидродинамического потока СПЖ и благодаря его диэлектрическим свойствам создаются области, которые содержат композицию распределенных свободных и связанных зарядов, генерирующих в этих областях квазистатическое поле [1, 4]. В заполняемом пространстве создается 2-е области, каждая из которых обладает диэлектрическими свойствами и может быть рассмотрена как конденсатор (рис. 1а), имеющий обкладки из заряженной плоскости раздела областей I, II и внутренней поверхности заполняемого объема. Энергия W данного конденсатора определяется

$$W = \frac{C\varphi_{\text{пов}}^2}{2} \quad (1)$$

где C – емкость конденсатора, Φ ; $\varphi_{\text{пов}}$ – потенциал поверхности СПЖ относительно стенок заполняемого объема, В.

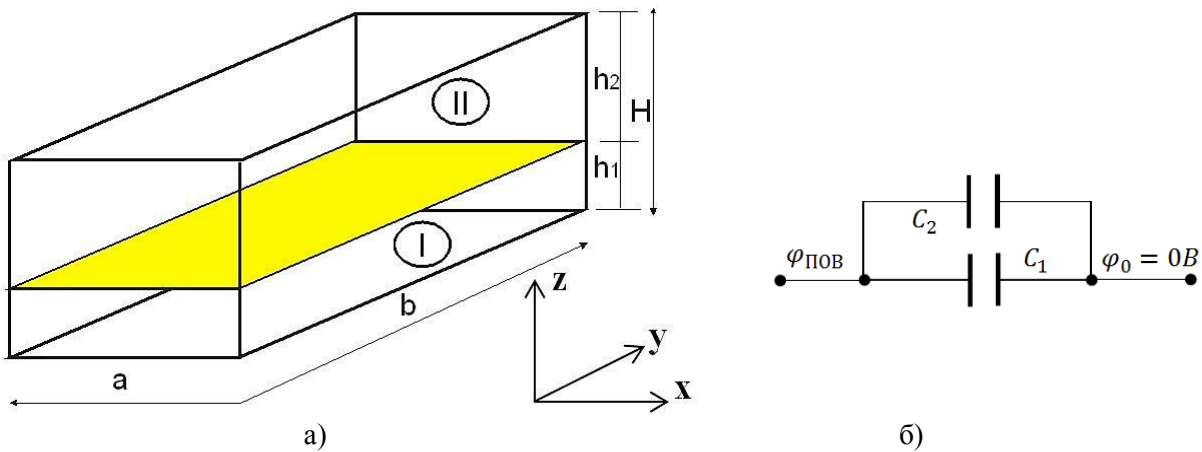


Рисунок 1 – а) схема заполнения объема, б) эквивалентная схема емкостей сред, заполняемых СПЖ

На рис. 1а показана схема заполнения объема, содержащего: область I – заполненную слабопроводящей жидкостью (СПЖ) с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 ; область II – заполненную паровоздушной смесью (ПВС) над поверхностью СПЖ с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 ; h_1 и h_2 – толщины слоев заполненных СПЖ и ПВС соответственно; H – высота заполняемого объема; a, b – длина и ширина сторон объема соответственно; x, y, z – направление расчетного сеточного метода в Декартовой системе координат при определении потенциальной картины заполняемого пространства.

На рис. 1б показана эквивалентная электрическая схема определения общей емкости заполняемого объема, образованного слоями СПЖ и ПВС.

Один слой h_1 конденсатора содержит свободные заряды, движимые гидродинамикой жидкости. Другой слой h_2 паровоздушная смесь – связанные заряды, поляризация которых вызвана движением свободных зарядов СПЖ.

В результате традиционного понимания емкости можно представить: что первой обкладкой конденсатора является непроницаемая и экранирующая область с потенциалом $\varphi_0 = 0$ кВ (внутренняя поверхность заполняемого объема), а второй обкладкой является заряженная плоскость раздела областей I и II, обладающая потенциалом на поверхности $\varphi_{\text{пов}} \leq 36$ кВ.

Таким образом, области I и II образуют в заполняемом объеме составной конденсатор из двух C_1 и C_2 (рис. 1б), а величина общего накопленного заряда в пространстве объема определяется:

$$Q = K_C \cdot \varphi_{\text{пов}} \cdot C, \quad (2)$$

где $C = C_1 + C_2$ – общая емкость областей, Φ ; K_C – коэффициент пропорциональности.

В процессе заполнения объема СПЖ меняется толщина слоев h_1, h_2 (рис. 1а), и соответственно емкость каждой из исследуемых областей согласно формуле:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / h, \quad (3)$$

где S – площадь поверхности электрода, м^2 ; h – толщина слоя области, м.

Накапливаемый заряд в танке Q создает квазистатическое поле [3, 4, 5], нормальная составляющая вектора электрической индукции которого в 1-й и 2-й средах непрерывна и равна $\bar{D}_{1n} = \bar{D}_{2n}$ соответственно, а тангенциальные составляющие напряженности поля на границе раздела диэлектриков СПЖ и ПВС также равны $\bar{E}_{1t} = \bar{E}_{2t}$. Так как $\bar{D}_{1n} = \epsilon_{a1} \bar{E}_1$ и $\bar{D}_{2n} = \epsilon_{a2} \bar{E}_2$, тогда:

$$\epsilon_{a1} \bar{E}_1 = \epsilon_{a2} \bar{E}_2, \quad (4)$$

т.е. напряженности в средах обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям, что говорит о росте напряженности в области ПВС [4].

Формулы (1–3) показывают связь заряд – потенциал ($Q - \varphi$), где главным выступает заряд, который является генератором поля в пространстве заполнения. Исследователи [4–7] в своих работах показали взаимосвязь заряда и потенциала, где расчет и моделирование проведено на основе заряда, а потенциал является следствием. Поэтому емкость и заряд указывают непосредственно на процесс создания поля, а потенциал является следствием его распространения в средах. Откуда в качестве критерия оценки безопасного состояния технологии должен выступать заряд Q .

Наблюдение за процессом заполнения показывает, что одновременно происходит изменение размера слоев и площадей первой обкладки конденсаторов C_1 и C_2 :

$$S_{C1} = (a \cdot b) + 2(a + b) \cdot h_1, \quad (5)$$

$$S_{C2} = (a \cdot b) + 2(a + b) \cdot h_2 = (a \cdot b) + 2(a + b) \cdot (H - h_1), \quad (6)$$

где S_{C1} и S_{C2} – изменение площади внутренней поверхности танка для каждого из образующихся областей переменной емкости, м².

Емкость обеих областей вычисляется:

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \cdot (S_{C1}/h_1); \quad (7)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \cdot (S_{C2}/h_2). \quad (8)$$

Осуществляем анализ изменения емкостных параметров сред, определяя отношения в правых частях формул (7, 8):

$$\frac{S_{C1}}{h_1} = \frac{(a \cdot b) + 2(a + b) \cdot h_1}{h_1} = 2(a + b) + \frac{a \cdot b}{h_1}; \quad (9)$$

$$\frac{S_{C2}}{h_2} = \frac{(a \cdot b) + 2(a + b) \cdot h_2}{h_2} = 2(a + b) + \frac{a \cdot b}{h_2}. \quad (10)$$

В результате, переменная емкость исследуемых областей изменяется по следующим законам относительно уровня заполнения:

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \cdot [(a \cdot b) + 2(a + b) \cdot h_1]/h_1; \quad (11)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \cdot [(a \cdot b) + 2(a + b) \cdot (H - h_1)]/(H - h_1). \quad (12)$$

Изменение общей емкости в заполняемом пространстве:

$$C = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot \left[4(a + b) + (a \cdot b) \cdot \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \right]; \quad (13)$$

где $h_1 = (F \cdot t)/(a \cdot b)$ – уровень слоя СПЖ, м; $h_2 = H - (F \cdot t)/(a \cdot b)$ – уровень слоя ПВС, м; F – расход насосной установки, м³/ч; t – время заполнения, с.

Зная величину емкости C и безопасный уровень потенциала поверхности $\varphi_{\text{MAX}} \leq 36$ кВ, определим величину заряда Q , накопившегося внутри объема по условию безопасности:

$$Q = C \cdot \varphi_{\text{MAX}} = C \cdot 36000. \quad (14)$$

Этот же заряд можно рассчитать по плотности потока входящего заряда вместе с СПЖ [2, 4, 6], а также через преобразование формулы (2.23) [2].

$$Q = \rho_0 \cdot e^{-t/\tau} = \rho_0 \cdot K_P \cdot [\tau \cdot (e^{-t/\tau} - 1) \cdot e^{-t/\tau}]; \quad (15)$$

где $\rho_0, \rho(t)$ – удельные объемные плотности заряда в начальный момент времени $\rho_0 = I_3/F$ и в момент времени t , $\rho(t) = \rho_{\text{вх}} \tau F/V$; $\tau = \varepsilon_0 \varepsilon_1/\gamma$ – время релаксации заряда, с; t – время заполнения, с; $V = a \times b \times h$ – объем заполненного пространства СПЖ, м³; γ – удельная электропроводимость жидкости; $I_3 = (A_i \cdot v^{m_i} \cdot d^{n_i})/(1,41 - 2 \lg(h_{\text{ЭК}}/d))$ –

ток заряджения, μA [4, 6, 7]; A_i, m_i, n_i – эмпирические коэффициенты заданной среды СПЖ; d – диаметр трубопровода, м; V – скорость потока ЖН в трубе, м/с; $h_{ЭК}$ – уровень шероховатости внутренней поверхности трубопровода, м; K_p – коэффициент изменения объема, содержащего свободные заряды [3].

Сравним формулы (14) и (15):

$$C \cdot \varphi_{\text{MAX}} = \rho_0 \cdot e^{-t/\tau}, \quad (16)$$

или

$$Q = C \cdot \varphi_{\text{MAX}} = \rho_0 \cdot e^{-t/\tau} = \rho_0 \cdot K_p \cdot [\tau \cdot (e^{-t/\tau} - 1) \cdot e^{-t/\tau}]. \quad (17)$$

Результат проведенного анализа показывает, что заряд Q в заполняемом пространстве является основным фактором, который генерирует как поле, так и сопутствующие ему параметры потенциал φ и напряженность \bar{E} .

Для подтверждения изложенного материала в динамике было проведено компьютерное моделирование изменения заряда Q в программной среде «MATLAB». На модели воспроизведен процесс заполнения объема $V=7225 \text{ м}^3$ (рис. 3). Структурная схема построения модели показана на рис. 2.

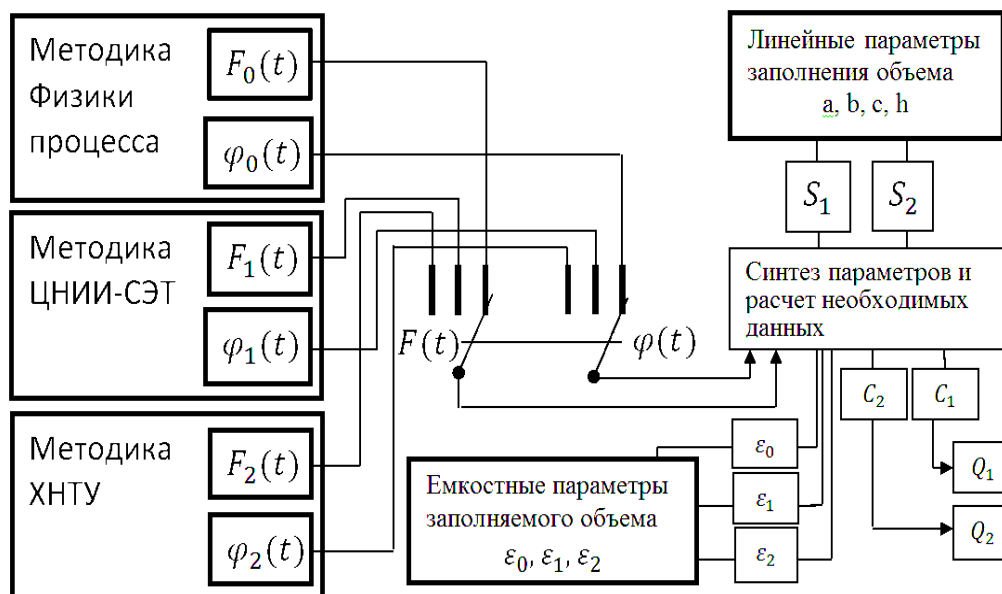


Рисунок 2 – Структурная схема модели процесса заполнения объема $V=7225 \text{ м}^3$

Представленная структурная схема модели (рис. 2) основывается на:

- 3-х методиках расчета, которые моделируют гидравлические параметры заполнения объемов СПЖ – $F(t)$ и потенциальные параметры картины квазистатического поля $\varphi(t)$;
- линейных параметрах заполняемого объема;
- емкостных параметрах этого же объема.

Перечень методик расчета:

- методика физики процесса – определяет картину роста потенциала во времени $\varphi_0(t)$ при различных фиксированных расходах $F_0(t)$ (рис. 4);
- методика ЦНИИ-СЭТ – определяет рост потенциала $\varphi_1(t)$ при использовании регулируемого расхода по программе $F_1(t)$ (рис. 5);
- методика ХНТУ – определяет рост потенциала $\varphi_2(t)$ при использовании нарастающего расхода $F_2(t)$ (рис. 6).

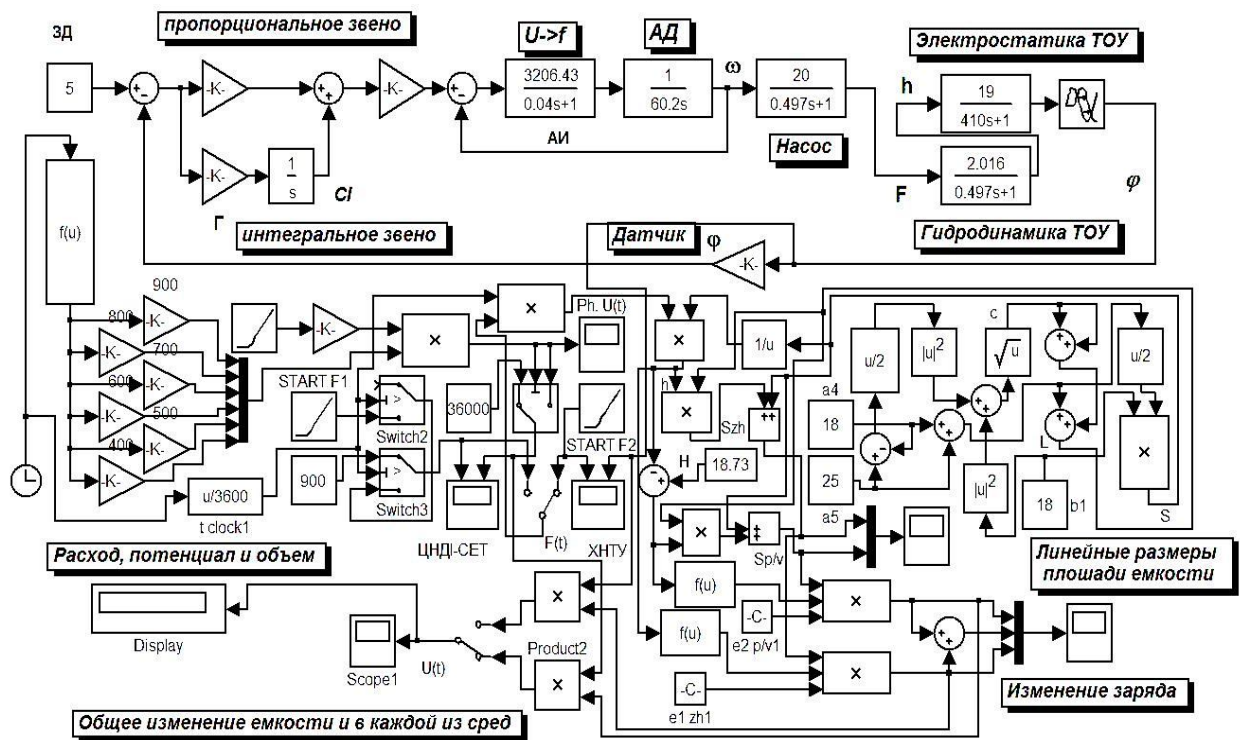


Рисунок 3 – Модель генерации процесса заполнения объема $V=7225 \text{ м}^3$ с использованием различных методик расчета

Проведенное моделирование показало следующие результаты:

- рост потенциала поверхности СПЖ φ при использовании постоянных технологических режимов заполнения в диапазоне $F = 400 \div 900 \text{ м}^3/\text{час}$ (рис. 4);
- рост потенциала поверхности СПЖ при использовании технологических режимов заполнения $F = 400 \div 900 \text{ м}^3/\text{час}$ по программе ЦНИИ-СЭТ (рис. 5);
- рост потенциала поверхности СПЖ при использовании технологических режимов заполнения $F = 0 \div 5000 \text{ м}^3/\text{час}$ по программе ХНТУ (рис. 6);
- изменение площади контакта сред с замкнутой поверхностью заполняемого объема S_{C1} и S_{C2} (рис. 7);
- изменение емкости $C_1(t)$ и $C_2(t)$ сред (рис. 8);
- изменение общего заряда в средах $Q(t)$ (рис. 9), в начале заполнения отсутствует среда, поглощающая избыточную входящую энергию квазистатического поля вместе с СПЖ;
- изменение уровня заполнения h_1 (рис. 10) показывает не только выполнение технологических требований подачи (рис. 5), но и начальную компенсацию скорости подачи для создания условий релаксации заряда входящего потока.

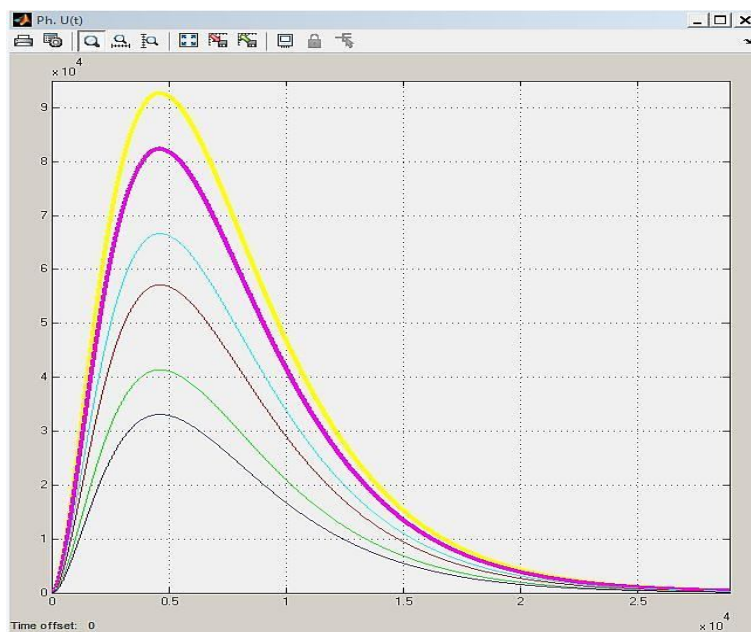


Рисунок 4 – Рост потенциала поверхности СПЖ при изменении расхода в диапазоне $F = 400 \div 900 \text{ м}^3/\text{ч}$

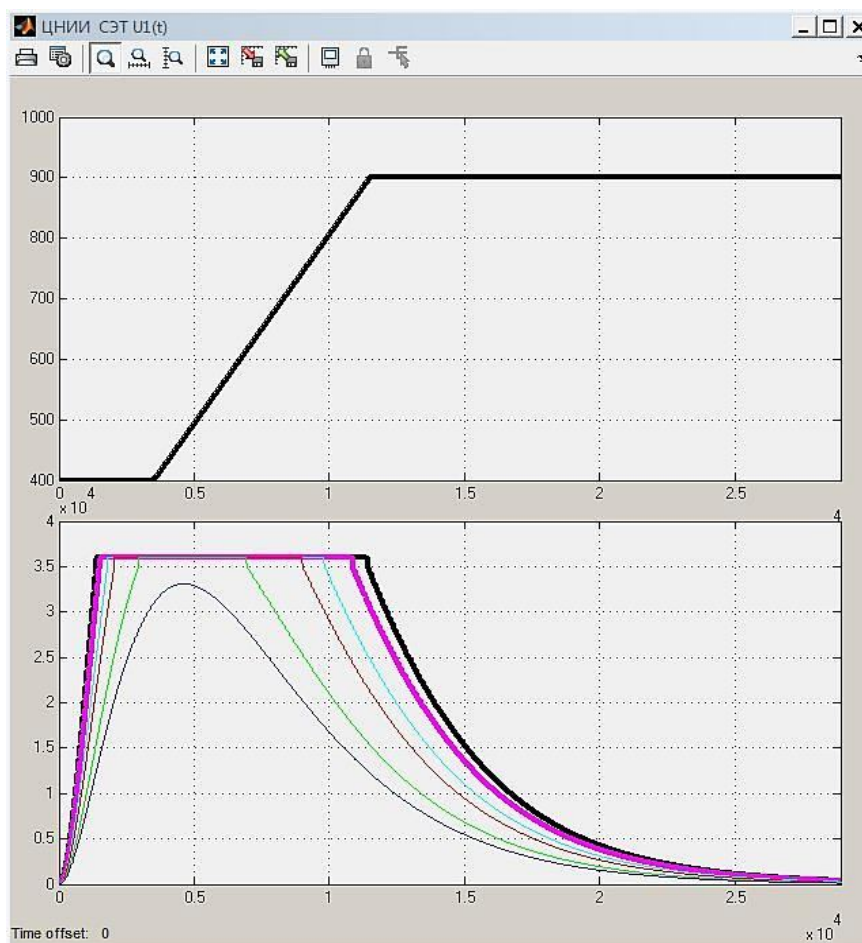


Рисунок 5 – Программа изменения расхода $F(t)$ (ЦНИИ-СЭТ) и изменение потенциала $\varphi(t)$ на поверхности СПЖ во время реализации этой программы



Рисунок 6 – Программа изменения расхода $F(t)$ (ХНТУ) и изменение потенциала $\varphi(t)$ поверхности СПЖ во время реализации этой программы

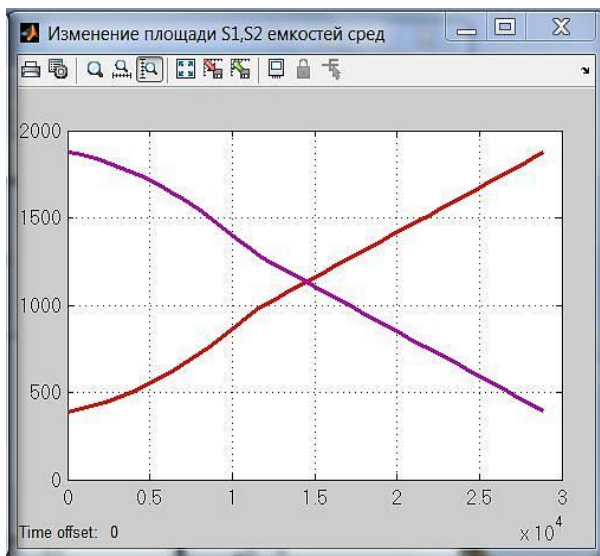


Рисунок 7 – Изменение площади $S(t)$ в средах

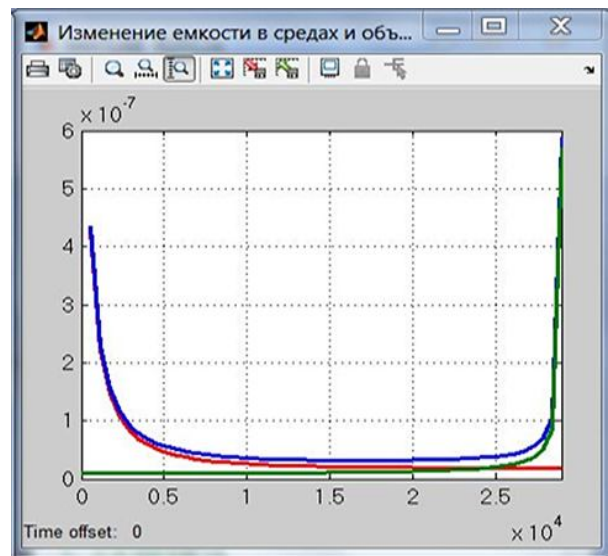


Рисунок 8 – Изменение емкости $C(t)$ в средах

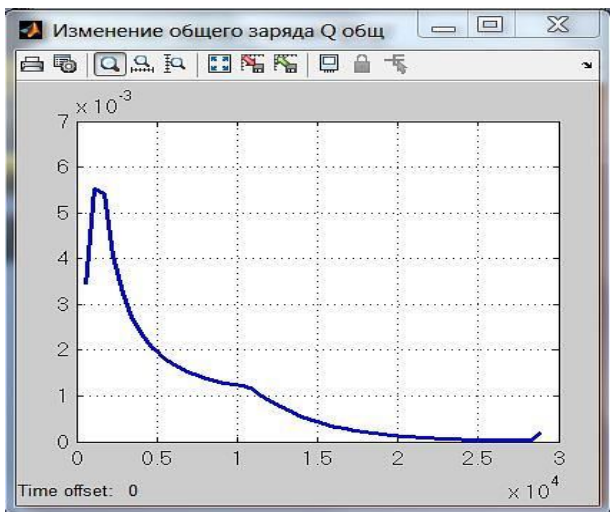


Рисунок 9 – Изменение заряда $Q(t)$ в объеме

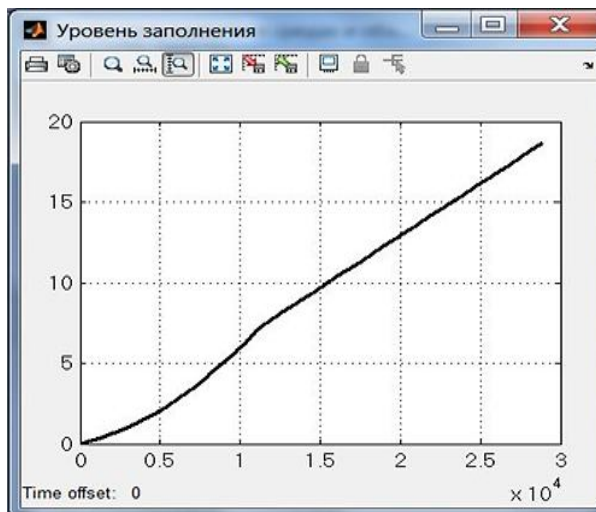


Рисунок 10 – Изменение слоя заполнения $h_1(t)$

При необходимости получения более точного результата потенциальной картины поля (например, по требованию технологии) следует ввести в модель гидродинамическую составляющую, которая определяет распределение потенциальной картины в объеме и на поверхности. Данная модель точечного гидродинамического источника с топологией (x_0, y_0, z_0) (рис. 11) предполагает, что потенциал поля скорости $(\vec{v} = -\nabla\varphi)$ подчиняется уравнению Пуассона [8]. Тогда при решении задачи целесообразно применить метод интегральных преобразований, который представлен в виде системы (18), в которой выбрано расчетное направление изменения параметра вдоль оси z в Декартовой системе [4].

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{cases} C, & z \leq z_0; \\ C - \frac{\omega}{AB}(z - z_0), & z \geq z_0; \end{cases} \\ B = \omega \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\cos \lambda_n \cdot x_0 \cdot \cos \lambda_m \cdot y_0 \cdot \cos \lambda_n \cdot x \cdot \cos \lambda_m \cdot y}{N_n^2 \cdot N_m^2} \\ C = \begin{cases} \frac{chK_{nm} \cdot z \cdot chK_{nm} \cdot (z_0 - h)}{K_{nm} \cdot shK_{nm} \cdot h}, & z \leq z_0; \\ \frac{chK_{nm} \cdot z_0 \cdot chK_{nm} \cdot (z - h)}{K_{nm} \cdot shK_{nm} \cdot h}, & z \geq z_0. \end{cases} \\ \varphi_z = A + (B \cdot C) \end{array} \right. \quad (18)$$

где $0 < x_0 < A$, $0 < y_0 < B$, $0 < z_0 < h$, $K_{nm} = \sqrt{\lambda_n^2 + \lambda_m^2}$, $\lambda_n = \frac{n\pi}{A}$, $\lambda_m = \frac{m\pi}{B}$,

$$N_n^2 = \begin{cases} A, & n = 0; \\ A/2, & n \neq 0; \end{cases} \quad N_m^2 = \begin{cases} B, & m = 0; \\ B/2, & m \neq 0; \end{cases}$$

A, B, h – длина, ширина, высота объема в M ;

m, n – шаги дискретизации по осям x, y ; x_0, y_0, z_0 – координаты начала расчета.

Поиск функции распределения заряда $\rho = f(x, y, z)$ в слое СПЖ осуществляется с помощью уравнения переноса $\partial\rho/\partial t + \rho/\tau + v\nabla\rho = 0$ с граничным условием $\rho(x_0, y_0, z_0) = \rho_0$ [2, 4]. Для этого в формулу закона изменения скорости жидкости вдоль естественной координаты (l) подставляем значения вектора скорости потока \bar{v} и находим искомое распределение заряда $\rho = f(x, y, z)$ в пространстве СПЖ.

В каждом конкретном случае необходимо производить перерасчет величины втекающего заряда ρ в связи с изменяющимся уровнем расхода $F \uparrow\downarrow$ по программе заполнения [3, 4].

Результат применения численного метода с использованием семиточечного расчетного шаблона [3, 4] позволяет получить потенциальную картину поверхности СПЖ и в заполняемом ею объеме, и таким образом распределение заряда на исследуемой поверхности. Процесс не только сложен для построения расчета, но и требует значительных вычислительных и временных ресурсов.

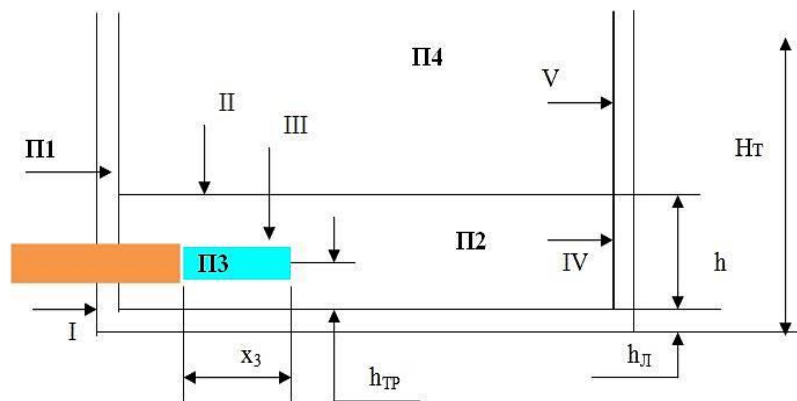


Рисунок 11 – Параметры заполняемого пространства

На рисунке (рис. 11) показаны условия подхода к расчету: I – металлический корпус объема; II – зеркало жидкости; III – струя – паровоздушное пространство; IV – жидкость – антикоррозионный слой; V – паровоздушное пространство – антикоррозионный слой. Среды и их параметры распределились как: П1 – антикоррозионный слой с параметрами $(\varepsilon_1, \gamma_1)$; П2 – слой, заполненный жидкостью с параметрами $(\varepsilon_2, \gamma_2)$; П3 – струя жидкости с параметрами $(\varepsilon_3, \gamma_3)$; П4 – паровоздушное пространство с параметрами $(\varepsilon_4, \gamma_4)$; x_3 – длина струи; $h_{тр}$ – высота трубопровода над дном объема; $h_{л}$ – толщина слоя лакокрасочного покрытия; H – уровень ЖН; h – требуемая высота объема заполнения.

Перечисленные данные являются основными параметрами, которые используются для получения картины распределения потенциалов на поверхности СПЖ.

Графический результат одного из таких расчетов показан на рис. 12. Для его получения необходимо было построить вычислительный модуль и графический драйвер вывода расчетных данных из базы накопленных данных на печать в пределах исследуемой плоскости X, Y раздела СПЖ и ПВС в масштабе, что заняло достаточно продолжительное время для его создания.

ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА (Пространство внутри жидкости)

ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕМА	ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ	РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
Ширина подволока	Уровень заполнения (м) : 15.01	Ток заряджения струи (мкА) : 15.131747400
верхнего (м) : 25.00	Время заполнения (с) : 6461	Втекающий объемный заряд (Кл) : .000016568
нижнего (м) : 18.20	Высота трубы от дна (м) : .20	№ плоскости раздела пространства : 7
Длина по киллю (м) : 18.20	Диаметр трубопровода (м) : .30	Длина струи в пространстве (м) : 1.25
Высота от дна (м) : 16.00	Производительность (м ³ /ч) : 3288.00	Нефтепродукт : Керосин ТС-1 &O

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Метод расчета => Точечный гидродинамический источник

Заполняемый объем => ТАНК ТАНКЕРА

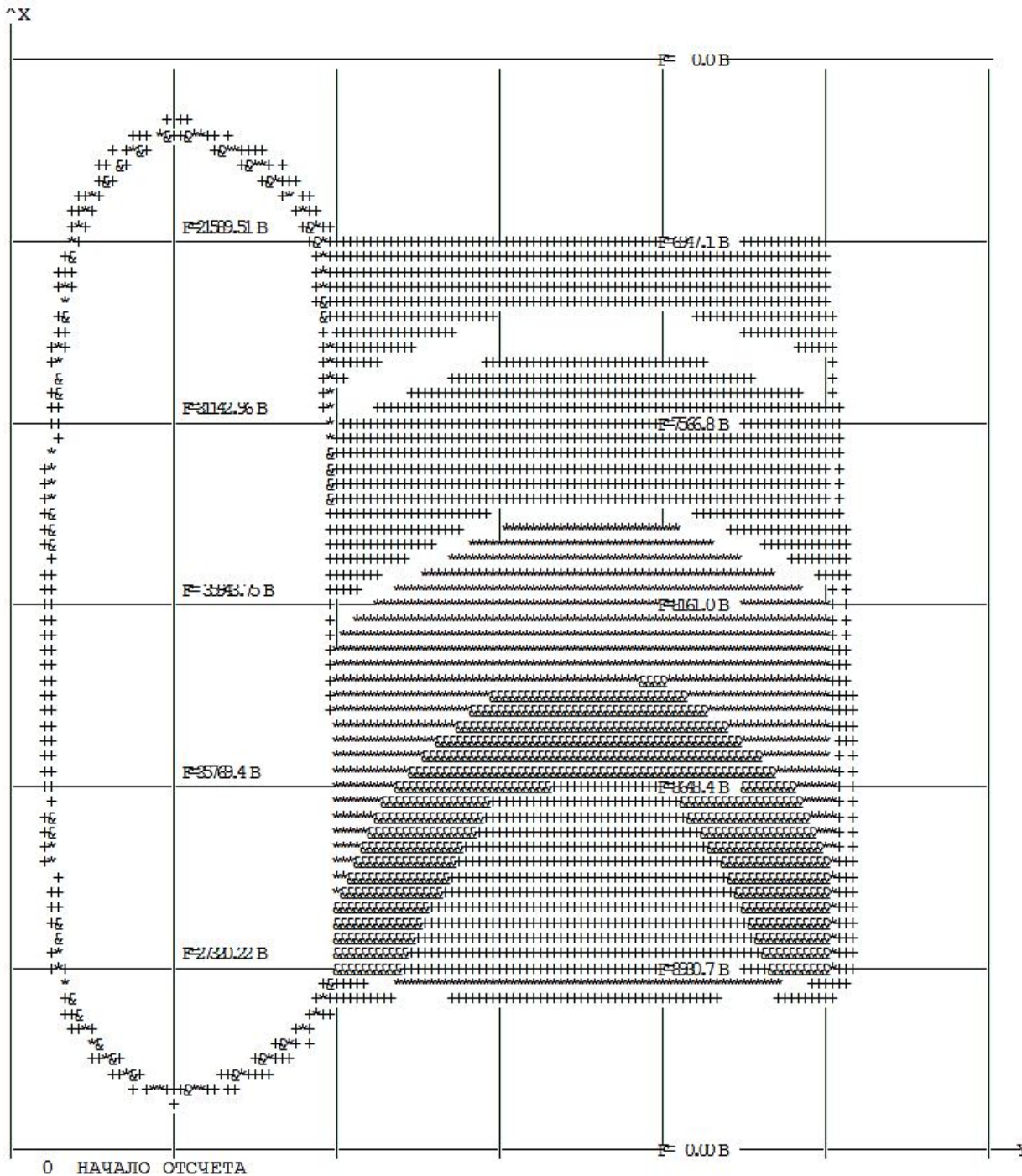


Рисунок 12 – Распределение потенциала (заряда) на поверхности раздела СПЖ и ПВС

На рис. 12 четко наблюдаются разные потенциалы в различных частях поверхности раздела СПЖ и ПВС. Следовательно, в каждой из областей с одинаковым потенциалом сосредоточен свой по величине и отличный от потенциала в других точках плоскости заряд Q , который стремится к усредненному распределению внутри слоя СПЖ в процессе собственной релаксации и гидродинамики потока СПЖ из точечного источника (отмеченного как 0,00 В).

Исследование левой части формулы (15) четко показывает взаимосвязь заряда с t – временем заполнения, τ – временем релаксации, $\rho_0(t)$ – удельной объемной плотностью втекающего заряда в объем вместе с СПЖ, то есть, за время t в объеме накопится заряд Q .

Единица объема вещества (СПЖ) обладает свойством поглощать и удерживать внутри себя определенное количество заряда без выделения его в виде разряда. Тогда, определив величину заряда Q во всем объеме и объем V заполненного СПЖ, можно вычислить заряд единицы объема $\rho = Q/V$, по величине которого определяют насколько безопасно состояние процесса заполнения в любой момент времени в исследуемой точке пространства СПЖ. Оценка состояния сравнивается с результатами лабораторных исследований свойств накопления энергии транспортируемых жидкостей, полученных в ячейках единичных размеров [9, 10], где состояние безопасности следует определять по максимальному потенциалу φ_{MAX} на поверхности СПЖ.

Например: для рис. 12 эта величина $\varphi_{\text{MAX}} = 35943,75$ В, где этот потенциал определяет состояние расчетного, максимального заряда Q_{MAX} .

Выводы. Емкость C , созданная свойствами сред в процессе заполнения СПЖ в объем, определяется:

- размерами заполняемого объема a, b, h ;
- свойствами среды СПЖ ε_1 , которую заполняют;
- уровнем расхода F ;
- временем t подачи, которое изменяется по логарифмическому закону;
- скоростью роста заряда $\uparrow Q$ двуслойного конденсатора и в два раза более скоростью роста потенциала поверхности $\uparrow \varphi_{\text{пов}}$;
- процессами начала и конца заполнения, а остальное технологическое время – свойствами распространения общего поля в средах (рис. 8).

Величина накопления заряда Q определяется:

- уровнем максимального потенциала поверхности раздела сред I и II;
- линейными размерами заполняемого объема a, b, h ;
- началом технологического процесса заполнения (рис. 9), свойствами и конфигурацией заполняемой среды ПВС и среды СПЖ;

Сам процесс расчета заряда Q в качестве критерия безопасности упрощается по уровню значений датчиков потенциала, а способность к выделению разряда определяется в лабораторных условиях для каждого из транспортируемых веществ (СПЖ) в ячейках единичных размеров.

Совокупность рассматриваемых физических процессов в заполняемом пространстве объема показывают, что заряд Q следует использовать в качестве критерия безопасности при определении ситуаций взрыва паров или зажигания заполняемой СПЖ. Современные приборы диагностирования потенциала на поверхности жидкости функционируют на основе измерения уровня заряда емкости, а величину потенциала получают через коэффициент пропорциональности K_C , выбранный для рабочего прибора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Критерий электростатического воспламенения : материалы Международной конференции по статическому электричеству. – Лондон : Лондонский институт физики, 1977. – 150 с.

2. Проведение испытаний и исследований по оценке электростатической опасности при заполнении и механизированной мойке грузовых танков : отчет по НИР, ЦНИИ–СЭТ, составлен на разработку ЦКБ «Изумруд». – Херсон, 1989. – 48 с.

3. Кириллов О. Л. Автоматизация процесу керування системами перевантаження рідинних нафтопродуктів зі слабкою провідністю в замкнуті об'єми : дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук: 05.13.07 / Олег Леонідович Кириллов. – Херсон, 2011. – 155 с.

4. Галка В. Л. Электростатическая безопасность нефтеналивных судов и кораблей / В. Л. Галка. – СПб. : Элмор, 1998. – 188 с.

5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник для электротехнических, энергетических, приборостроительных, специальных вузов. – М. : Высшая школа, 2001. – 263 с.

6. Портной Г. Н. Распределение зарядов в движущейся слабопроводящей жидкости / Г. Н. Портной, И. А. Юдин // Письма в ЖТФ. – М. : Наука, 1984. – Т. 10. – Вып. 15. – С. 897–959.

7. Максимов Б. К. Электростатическая безопасность при заполнении резервуаров нефтепродуктами / Б. К. Максимов, А. А. Обух, А. В. Тихонов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 154с.

8. Смайт В. Электростатика и электродинамика [микроформа] / пер. с англ. А. В. Гапонова и М. А. Миллера / В. Смайт, Р. Вильям. – М. : РГБ, 2007. – 604 с.

9. Тодорцев Ю. К. Исследование подходов к оценке воспламеняемости светлых жидких нефтепродуктов с низкой проводимостью в замкнутых объемах / Ю. К. Тодорцев, О. Л. Кириллов // Вестник ХНТУ. – 2012. – № 4(45). – С. 90–94.

10. Кириллов О. Л. Подходы к методике оценки опасности появления искр в процессе перегрузки слабопроводящих жидких нефтепродуктов / О. Л. Кириллов // Вестник ХНТУ. – 2012. – № 4 (45). – С. 58–61.

REFERENCES

1. *Kriteriy electrostaticheskogo vosplamneniya. Mezhdunarodnaya konferentsiya po staticheskomu elektrichestvu. (1977). London.: Istitute of phiziks, 150p.*

2. *Provedeniye ispitaniy & issledovaniy po otzhenke elektroctaticheskoy opasnosti pri zapolnenii & mechanizirovannoy moyke gruzovih tankov. Otchet po NIR (1989), TZNII-SET. Soctavlen na razrabotku TzKB «IZUMRUD». Kherson, 48p.*

3. *Kirillov, O.L. (2011). Avtomatizatzhiya protzhesu keruvannya sistemamy perevantazhennya ridunnych naftoproductiv zi clabkoyu providnistyu b zamknuty obyemy. Candidate's thesis. Kherson: KNTU.*

4. *Galka V.L. (1998). Electrostatitzheskaya bezopasnost neftenalivnih sudov & korabley. SPb.: Elmor. 188p.*

5. *Bessonov L.A. (2001). Teoreticheskiye ocnovi elektrotehniki. Elektromagnitnoye pole. Moskva.: Visshaya Shkola. 263p.*

6. *Portnoy G.N. & Yudin E.A. (1984). Raspredeleniye zaryadov v dvizhusheysya zhedkosti. Pisma v ZhTF, tom-10. Moskva.: Nauka. 897-959p.*

7. *Maksimov B.K., Obuh A.A. & Tihonov A.B. (1989). Electrostatitzheskaya bezopasnost pry zapolnenii rezervuarov nefteproductamy. Moskva.: Energoatomizdat. 154p.*

8. *Smayt V. & Vilyam R. (2007). Electrostatika I elektrodinamika. (Gaponova A.V. & Miller M.A, Trans). Moskva.: RGB. 604p.*

9. *Kirillov, O.L. & Todortzhev Yu.K. (2012). Issledovaniye podhodov k otzhenke vosplamnyaemosti svetlyh zhidkih nefteproductov s nizkoy provodimostyu v zamknutyh obyomah. Kherson. Vestnik KNTU №44. 90-94p.*

10. *Kirillov, O.L. (2012). Podhody k metodyke ozhenky opasnosti poyavleniya iskr v protsesse peregruzky claboprovodyashih zhidkih nefteproductov. Kherson. Vestnik KNTU №45. 58-61p.*

Кириллов О. Л. ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИБІР КРИТЕРІЮ БЕЗПЕКИ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ СЛАБОПРОВІДНИХ РІДИН В ЗАКРИТІ ОБ'ЄМИ

У статті проведений аналіз, дослідження і вибір заряду Q , у якості критерію безпеки. Порівняно з іншими критеріями, наприклад, потенціал φ і напруженість H , заряд є найбільш простим параметром для опису стану електричної безпеки при заповненні нафтопродуктів в замкнуті об'єми завдяки аналізу рівня заряду в одиниці об'єму рідини, яка транспортується. Визначені методи і дан аналіз сучасних засобів діагностування при виявленні стану небезпечного заряду у нафтопродукті, подано його простий аналіз.

Ключові слова: вибір заряду у якості критерію безпеки, простий параметр, який описує стан безпеки, заповнення нафтопродуктів в замкнуті об'єми, аналіз засобів діагностування, небезпечний заряд.

Kirillov O. L. RESEARCH AND CHOICE OF CRITERION OF SAFETY AT TRANSPORTING TO CONDUCT OF WEAK OF LIQUIDS IN CLOSED VOLUMES

Introduction. *The process of portage of liquids (factions of oil) which conduct poorly in the reserved volumes is necessarily related to electrostatic charge storage in them, and research of process of accumulation drove to 60–70 to development of base criterion of the state of safety of this process. At the arbitrary change of the mode of serve of factions of oil in the reserved volume the level of the accumulated charge into a volume arrives at a critical value. On an interphase steam-air space is a liquid there are digits, defiant spunking or explosion and accordingly destruction of capacity. As a criterion potential of surface of liquid was chosen.*

The analysis of the chosen criterion does not allow to understand the mechanism of forming of physical process of creation of the field. A criterion shows the field and his description without the analysis of the transported material and understanding of forming of the field.

Therefore conducting the analysis of process of filling in technology, the size of charge of unit of volume is offered as a criterion of safety of technology of portage.

Purpose of work. *Choice of new criterion of safety and being of intercommunication of capacity properties of the filled reserved volume with the technological parameters of filling in the process of accumulation of energy of the quazystatic field into the filled liquid.*

Comparison of analytical research of change of capacity of the filled space with the safe level of potential of surface $\varphi_{\text{MAX}} \leq 36 \text{ kV}$ and allows the size of charge, accumulated into a volume, to assert that a charge Q in the filled space is a basic factor, which generates both the field and concomitant to him parameters, potential φ and tension \bar{E} .

Conclusions. *Closeness of charge in unit of volume in the moment of time t , $\rho(t) = \rho_{\text{BK}}\tau F/V$ characterizes the state of safety of process and is a basic criterion, qualificatory the danger of process of filling.*

Keywords: *choice of charge Q as a criterion of safety, potential φ and field tension \bar{E} , filling factions of oil in reserved volume, analysis of facilities of diagnosticating, dangerous charge.*

© Кириллов О. Л.

Статтю прийнято
до редакції 10.05.17

УДК 004.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КООРДИНАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА

Ляшенко Е. Н., к.т.н., доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, Украина, e-mail: olenakntu@gmail.com, ORCID:0000-0002-5429-8389;

Кирийчук Д. Л., к.т.н., доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, Украина, e-mail: kidiam@mail.ru, ORCID:0000-0002-4905-6932;

Ложкин Р. С., аспирант кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, Украина, e-mail: ruslanlozhkin@gmail.com, ORCID:0000-0002-6553-7576.

В работе рассмотрены методологические подходы к моделированию и координационному управлению в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера. Разработана формальная модель координации действий органов управления в системе поддержки принятия решений при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного характера в условиях дефицита времени. Предложена структура иерархической многоуровневой системы координационного управления в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций. Выделены уровни управления системой. Показано, что на каждом уровне могут быть выделены: координирующие органы управления и постоянно действующие органы управления. Предложена концептуальная структура системы поддержки принятия решений при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: координация действий, чрезвычайные ситуации природного характера, система координационного управления, система поддержки принятия решений.

Введение. Чрезвычайные ситуации природного характера (ЧСПХ) ежегодно уносят тысячи человеческих жизней и наносят огромный материальный ущерб. Наиболее распространенным классом ЧСПХ являются пожары в природных экосистемах.

Так, по данным Центра пожарной статистики Международной ассоциации пожарно-спасательных служб за последние пять лет в Море было зарегистрировано в среднем 3.4 млн. пожаров в год, жертвами которых стали 24 тыс. человек [1].

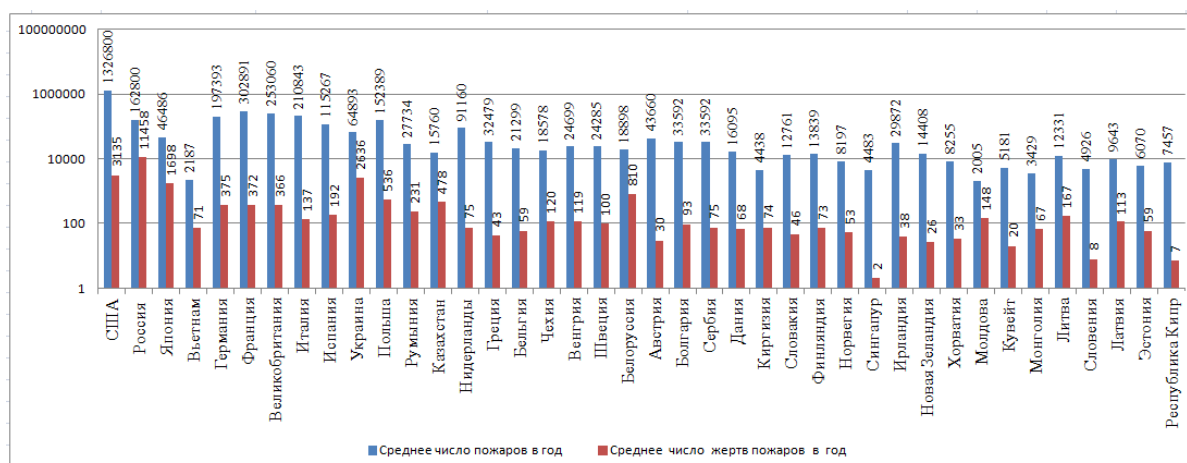


Рисунок 1 – Статистика пожаров в странах мира

Согласно рис. 1 лидером по числу пожаров является США, где за последние пять лет было зарегистрировано в среднем 1.3 млн. пожаров в год, жертвами которых стали более 3.1 тыс. человек.

Лидерами по числу жертв пожаров являются Россия и США, где число жертв составило в среднем 11.5 и 3.1 тыс. человек в год.

Следует отметить, что проблема пожаров актуальна и для Украины, где за последние пять лет было зарегистрировано в среднем 64.9 тыс. пожаров в год, жертвами которых стали более 2.6 тыс. человек [1].

Для решения данной проблемы требуется четкая координация действий различных органов управления, а также интеграция материально-технических ресурсов для проведения аварийно-спасательных и других видов работ при ликвидации последствий ЧСПХ.

Постановка проблемы. При возникновении ЧСПХ требуется принимать меры по их предотвращению и ликвидации последствий. Эффективность данных мер напрямую зависит от скоординированности действий различных органов управления, а также специализированных подразделений и формирований, участвующих в аварийно-спасательных и других видах работ, направленных на спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение ущерба окружающей природной среде и материальных потерь, а также на прекращение действия характерных для ЧСПХ опасных факторов.

Деятельность органов управления по предотвращению возникновения и ликвидации последствий ЧСПХ предполагает сбор данных о ЧСПХ, анализ и оценку обстановки ЧСПХ, подготовку выводов и предложений для принятия решения о проведении аварийно-спасательных и других видов работ, принятие (уточнение) решения и доведение задач до исполнителей (специализированных подразделений и формирований), организацию координационного взаимодействия между подразделениями, принимающими участие в ликвидации последствий ЧСПХ.

Решения о проведении работ по предотвращению возникновения и ликвидации последствий ЧСПХ зачастую принимаются в различных труднопредсказуемых нештатных ситуациях. Влияние факторов неопределенности и субъективности, а также наличие динамических возмущений различной природы приводят к необходимости постоянной корректировки принятых решений. Кроме того, чем выше сложность и масштаб ЧСПХ, тем труднее обеспечивать координационное взаимодействие привлекаемых подразделений и формирований. А складывающийся в условиях ЧСПХ дефицит времени на принятие решений усугубляет проблему координационного взаимодействия, которая становится трудноразрешимой.

Таким образом, разработка модели в системе поддержки принятия решений (СППР), которая позволит координировать действия привлекаемых специализированных подразделений и формирований при ликвидации последствий ЧСПХ в условиях неопределенности и неполноты информации о ЧСПХ, а также дефицита времени на принятие решений является важной и актуальной научно-практической проблемой.

Анализ литературных данных. В настоящее время наиболее активным направлением исследований являются системы поддержки принятия решений, предметная область которых связана именно с ликвидацией последствий ЧС.

Анализ работ [2–5] показал, что достаточно широкая аудитория исследователей ставила перед собой задачу информационной поддержки принятия решений при ликвидации последствий ЧС.

Так, в работе [2] предложены модели сценариев управления ликвидаций ЧС, отличительными особенностями которых являются учет межуровневых информационных связей в иерархической структуре системы управления, а также учет связей и взаимодействия процессов развития опасных факторов ЧС и действий по их ликвидации. Использование предложенных моделей позволяет оперативно прогнозировать суммарные потери от ЧС с учетом выбранного плана ликвидации. Также в работе [2] предложены структура и функциональный элементный состав СППР, использование которых при реализации информационного обеспечения систем предупреждения и ликвидации ЧС позволяет повысить оперативность и эффективность формирования планов управления, расширить функциональные возможности участников ликвидации в части оценки и оптимизации реализуемых сценариев управления.

В работе [3] предложен подход к формированию модели задачи пользователя в рамках интеллектуальной СППР и решения данной задачи как задачи удовлетворения ограничений. Подход заключается в интеграции информации и знаний, релевантных задаче, в контекст задачи, построении онтологической модели задачи и генерации объектно-ориентированной сети ограничений, описывающей данную задачу. Подход учитывает динамические изменения окружающей среды, которая моделируется набором данных, поставляемых источниками информации.

В основе подхода лежит двухуровневая схема поддержки принятия решений, включающая в себя подготовительный и основной уровни. В работе также показано соответствие между процессами, происходящими на основном уровне, и процессами, предусмотренными трехфазной моделью принятия решений («идентификация» – «разработка» – «выбор»), используемой при принятии управленческих решений. В рамках предложенного подхода используются технологии управления онтологиями, управления контекстом и удовлетворения ограничений. Применение данных технологий зависит от типа решаемых в процессе формирования и принятия решения задач.

В работе [4] предложена модель СППР, позволяющая координировать действия привлекаемых для ликвидации ЧС трансграничного характера сил, средств и ведомств сопредельных государств. Основными регулируемыми параметрами в модели являются количественные характеристики множеств разнородных ресурсов – используемые средства, привлекаемые силы. Предложенная технология позволила объединить разнородные ресурсы, а также заложить основы для создания интегрированных информационных СППР по управлению аварийно-спасательными работами в случае возникновения ЧС и пожаров трансграничного характера.

В работе [5] предметом исследования являются процессы принятия управленческих решений при ликвидации крупных пожаров и ЧС с использованием многоагентного подхода. Для совершенствования принятия решений руководителями пожарно-спасательных подразделений в работе предложены методы интеллектуального анализа данных и механизмы распределения ресурсов. Также в работе [5] предложен метод моделирования организационной структуры системы управления пожарно-спасательными подразделениями с использованием технологии многоагентных систем, позволяющий, исходя из имеющихся человеческих ресурсов и возможностей, определить, какие именно люди должны занять те или иные должности в структуре управления. В работе также предложена схема согласования решения для организации взаимодействия различных подразделений при ликвидации крупных пожаров и ЧС.

По результатам анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что в подавляющем большинстве работ для решения поставленных задач использовались такие методы исследования как системный анализ, теория управления, теория активных систем, теория операций, теория принятия решений. Недостатком использования таких методов является высокая вычислительная сложность, препятствующая достижению требуемого быстродействия СППР.

Следует отметить, что теория координации для решения задач управления в условиях возникновения ЧС практически не использовалась и соответствующие модели на сегодняшний день отсутствуют. Это обуславливает актуальность и необходимость дальнейших исследований в области построения моделей координационного управления в СППР при ликвидации последствий ЧСПХ.

Структура иерархической многоуровневой системы координационного управления. Для координации действий привлекаемых специализированных подразделений и формирований при ликвидации последствий конкретной ЧСПХ на региональном, местном и объектовом уровнях управления создаются специальные комиссии по вопросам техногенно-экологической безопасности и ликвидации ЧСПХ (ТЭБ и ЧС) [6].

В условиях возникновения ЧСПХ комиссия по вопросам ТЭБ и ЧС привлекает к выполнению работ по ликвидации последствий ЧСПХ необходимые подразделения и формирования, используя имеющиеся материально-технические, продовольственные и другие ресурсы и запасы, определяет границы территории, на которой возникла ЧСПХ, определяет размеры ущерба, причиненного субъектам хозяйственной деятельности и населению в результате ЧСПХ.

Постоянно действующими органами управления в условиях возникновения ЧСПХ являются подразделения и различные формирования Государственной службы по чрезвычайным ситуациям Украины (ГСЧС Украины).

Так, ГСЧС Украины имеет в своем подчинении оперативно-спасательную службу гражданской защиты населения и территорий от ЧСПХ, государственные пожарно-спасательные части (отряды), аварийно-спасательные отряды специального назначения и специализированные формирования [6].

На рис. 1 приведена система координационного управления в условиях возникновения ЧСПХ.

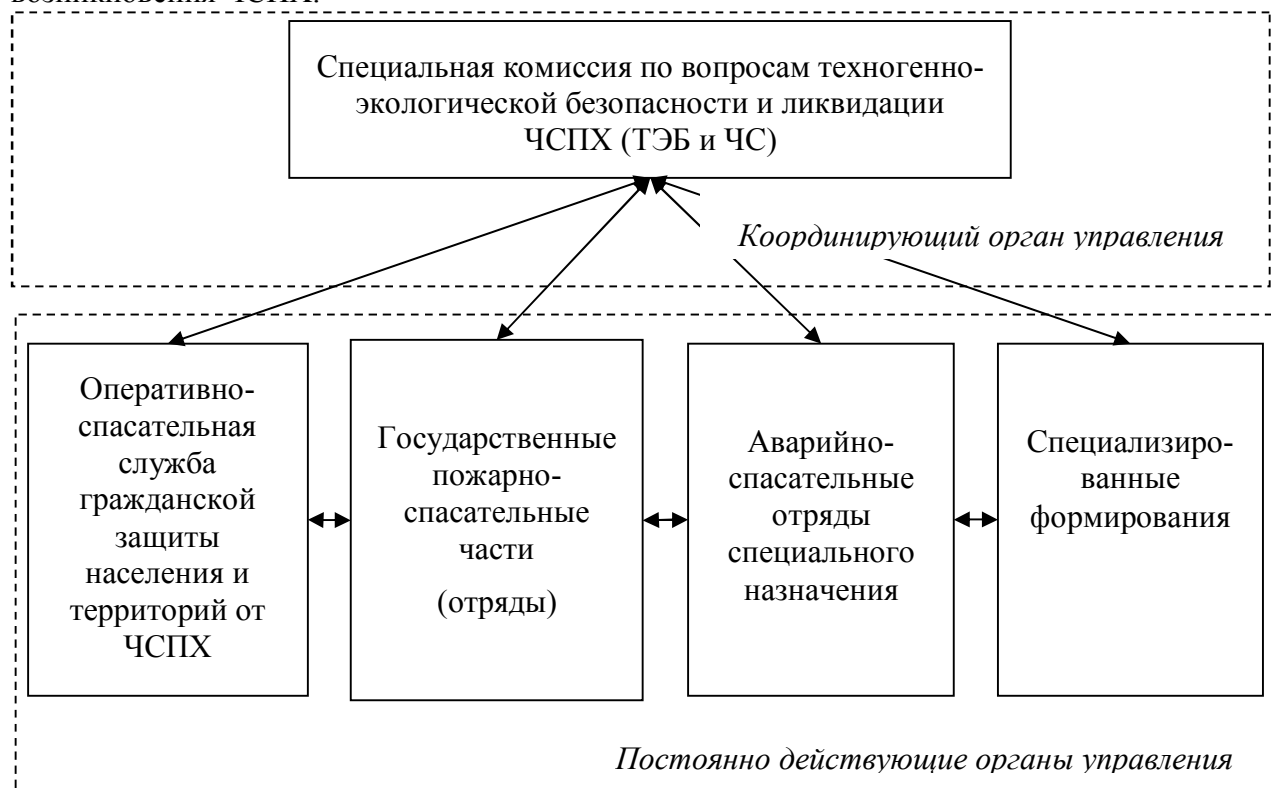


Рисунок 1 – Структура иерархической многоуровневой системы координационного управления в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций

Система, представленная на рис. 1, имеет иерархическую структуру. Следовательно, ее можно отнести к классу иерархических систем. Рассмотрим вопросы координации в иерархической системе (рис. 1), образованной органами управления в процессе совместной целенаправленной деятельности, основываясь на [7–10].

Модель координации действий. Зададим множество значений времени T . Введем шкалу времени, задав отношение частичного порядка $<_T$ и начальное значение времени t_0 . Пусть имеется также множество Y некоторой природы, и на этом множестве задана алгебра σ_Y .

Введем линейное нормированное равномерное пространство C с нормой: $\|y\|_c = \min_{t \in [0, T)} (y(t))$.

Введем на T метрику ξ_T . Зададим, соответствующую норме $\|y\|_c$, метрику

$$\xi_C(y_1, y_2) = \|y_1 - y_2\|.$$

Построим иерархическую систему (ИС) Θ с n уровнями иерархии управления, для чего введем на пространстве S множество объектов: $S = \{S_{ij}\}$, где i – уровень управления, $i \in [1..n]$, содержащий m_i объектов; j – индекс конкретного объекта уровня i , $j \in [1..m_i]$.

Исходя из того, что всякий объект $S_{ij} \in S$ представляет собой определенный орган управления либо исполнителя, построим иерархию объектов Y в виде тройки: $Y = \langle \perp, S, \prec \rangle$, где S – множество объектов иерархии; \prec – отношение нестрогого порядка, заданное над S ; \perp – наименьший элемент для \prec .

Отношение порядка \prec представляет отношение подчиненности объектов: так, $S_{ij} \prec S_{kl}$ означает, что объект S_{ij} подчинен объекту S_{kl} . Соответственно, в указанной паре S_{ij} является управляемым объектом (исполнителем), а S_{kl} – управляющим объектом (органом управления), формирующим для S_{ij} (и других подчиненных объектов) управляющие воздействия.

Предположим, что всякий объект S_{ij} иерархии Y выполняет на пространстве C некоторую активность, связанную с достижением некоторой цели $G_{ij} \in C$, заданной для S_{ij} объектом S_{kl} , таким, что $S_{ij} \prec S_{kl}$ и имеющей некоторое количественное либо качественное описание в C .

Пусть для достижения цели G_{ij} объекту S_{ij} требуется выполнить в пространстве C множество итеративных или рекурсивных операций управления $\{u_{ij1}, \dots, u_{ijk}\}$. Всякая итеративная операция осуществляет приближение к цели G_{ij} одним из методов $M_q \in M_{G_{ij}}$, а всякая рекурсивная операция последовательно отбирает лучший в некотором смысле метод M^* из множества $M_{G_{ij}}$ подходящих методов для достижения G_{ij} .

Тогда пространство C является пространством состояний для объектов множества S , а активность всякого объекта $S_{ij} \in S$ может быть представлена выполнением определенной программы (управляющей процедуры, плана) P_{ij} , представляющей собой последовательность операций управления $[u_{ij1}, \dots, u_{ijl}]$, которые должны приближать объект S_{ij} к цели G_{ij} .

Степень достижения цели G_{ij} будем характеризовать вектором критериев Q_{ij} , где критерий $Q_k \in Q_{ij}$ представляет собой шкалу для оценки близости к цели. Для каждого $Q_k \in Q_{ij}$ может быть построена процедура γ_k , позволяющая всякому решению $y \in Y$ поставить в соответствие значение $Q_k : \|y\|_C = \gamma_k(y)$.

Пусть на каждом шаге $i=1..k$ выполнения последовательности операций управления $[u_{ij1}, \dots, u_{ijl}]$ ИС Θ переходит из некоторого состояния $x_q \in C$ в другое состояние $x_{q+1} \in C$. Введем показатель расстояния δ до цели G_{ij} в некотором

состоянии $x_q \in C : \delta = \|x_q - G_{ij}\|$.

Пусть на каждом шаге процедуры поиска решения проблемы существует подмножество $M_{G_{ij}}$ подходящих методов. Тогда на шаге i при $z = |M_q|$ для каждого из методов $M_q \in M_{G_{ij}}$ можно оценить расстояние δ_q^{i+1} , что дает возможность выбрать «наилучший» для данного шага метод: $q^* = \arg \min(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_z)$, т.е. тот метод M_{q^*} , который ближе всего приводит к цели G_{ij} .

Введем вектор R_{ij} , включающий ограничения $R_l \in R_{ij}$, и для каждого из них построим процедуру ξ_l , позволяющую некоторому состоянию $x_q \in C$ поставить в соответствие значение $R_l : \|y\|_c = \xi_l(x_q)$.

В ИС Θ управляющая процедура для объекта S_{ij} задается (строится) лицом, принимающим решение (ЛПР) в соответствии с установкой $Z_{ij} = \langle G_{ij}, Q_{ij}, R_{ij} \rangle$, включающей цель G_{ij} , критерии Q_{ij} и ограничения R_{ij} (например, на множестве доступных ресурсов либо по времени).

Обобщенная задача принятия решения по управлению объектом S_{ij} , связанная с достижением цели G_{ij} , может быть сведена к задаче синтеза процедуры: $\Omega_{ij\langle Z \rangle} : x_{ij} \rightarrow y_{ij}$, где $x_{ij} \in C$ – исходное множество данных и знаний; $y_{ij} \in Y$ – решение; Z_{ij} – установка ЛПР; $\Omega_{ij\langle Z \rangle}$ – процедура (план) решения $y_{ij} \in Y$, позволяющего достичь цели G_{ij} или максимально приблизиться к ней в условиях Z_{ij} .

Если цель G_{ij} каждого объекта $S_{ij} \in S$ может быть определена как определенная точка или область в пространстве состояний C , которой требуется достигнуть, то цель Γ ИС Θ может быть выражена как желаемое состояние $x_* \in C$, при котором каждый из $S_{ij} \in S$ достиг своей цели G_{ij} .

Обобщенная задача принятия решения по управлению ИС Θ , связанная с достижением цели Γ , сводится к задаче синтеза управляющей процедуры: $\Omega_{\Theta} : \Omega_{ij} \circ \Omega_{jk} \circ \dots \circ \Omega_{nm}$, где Ω_{ij} – процедура решения, синтезированная для всех $S_{ij} \in S$; \circ – операция композиции.

Для синтеза процедуры Ω_{Θ} , в свою очередь, необходимо решить задачу координации управляющих процедур $K : (\{\Omega_{ij}, \dots, \Omega_{kl}\}) \rightarrow \{\Omega'_{ij}, \dots, \Omega'_{kl}\}$, при этом каждая процедура Ω_{ij} представляет собой взаимосвязанную последовательность операций вида $[u_{ij1}, \dots, u_{ijl}]$.

Всякая операция u_{ijl} может быть представлена как пара, $u_{ijl} = (t_{ijl}, a_{ijl})$, где a_{ijl} – некоторое действие; t_{ijl} – момент времени запуска действия a_{ijl} на выполнение. Таким образом, операция рассматривается как некоторое действие (например, изменение значения определенного параметра объекта), производимое в заданный момент времени.

Тогда для координации объектов необходимо развернуть управляющие процедуры

в последовательности действий: $\Omega_{ij} = [m_{ij1}, m_{ij2}, \dots, m_{ijk}] = [(t_{ij1}, a_{ij1}), (t_{ij2}, a_{ij2}), \dots, (t_{ijk}, a_{ijk})]$, при этом согласование взаимосвязанных операций по моментам запуска на выполнение (синхронизация по времени) составляет суть задачи координации действий. Цель координации действий состоит в установке корректных точек синхронизации $t_{ij1}^*, \dots, t_{ijl}^*$ в согласуемые последовательности выполняемых операций.

Задачей I_{ij} назовем процесс построения соответствующего заданному вектору критериев Q_{ij} решения $\Omega_{ij(Z)}$, представляющего план P_{ij} в исходном состоянии $x \in C$. Методом решения задачи I_{ij} будем называть последовательность действий $[(t_{ij1}, a_{ij1}), (t_{ij2}, a_{ij2}), \dots, (t_{ijk}, a_{ijk})]$, упорядоченных с помощью отношения частичного порядка \prec_a , которое может быть задано с помощью метрики ξ_T .

Пусть I^* – множество задач, которые объектам $S_{ij} \in S$ необходимо совместно решить в процессе достижения целевых состояний $G_{ij} \in \Gamma$. Построим на основе I^* сеть задач $N = (\{I_{11}, I_{12}, \dots, I_{nm}\}, \prec_I)$, где \prec_I – отношение частичного порядка на I^* .

Задачи возникают и завершаются динамически по мере появления или исчезновения внешних возмущений, поэтому решение задач во времени может быть последовательным или параллельным. Отношение порядка \prec_I на множестве задач I^* позволяет выстроить в Ω_Θ процедуры Ω_{ij} по приоритету и срочности их решения и может быть задано с помощью метрики ξ_T .

Для согласования управляющих процедур необходимо: а) задать отношение порядка \prec_I ; б) задать отношение порядка \prec_a ; в) синхронизировать компоненты Ω_{ij} процедуры Ω_Θ по \prec_I , а операции u_{ijl} процедур Ω_{ij} – по \prec_a . Тогда порядок \prec_a позволяет установить на шкале времени точки синхронизации t_Z , такие что $\exists t_{ij}, t_{kl} | t_{ij} = t_Z \wedge t_{kl} = t_Z$ для $\Omega_\Theta = [(t_{ijk}, a_{ijk}), \dots, (t_{jlm}, a_{jlm})]$.

Решение задачи координации $K : (\{\Omega_{ij}, \dots, \Omega_{kl}\}) \rightarrow \{\Omega'_{ij}, \dots, \Omega'_{kl}\}$, таким образом, заключается в расстановке необходимых точек синхронизации в процедуре Ω_Θ , для чего можно использовать методы динамического удовлетворения ограничений [10].

Концептуальная структура СППР. На основе, предложенной в работе модели, разработана СППР при ликвидации последствий ЧСПХ, которая состоит из четырех подсистем (рис. 2): подсистемы оперативного доступа, подсистемы моделирования, подсистемы поддержки принятия решений и подсистемы баз данных (БД) [11].

В зависимости от масштабов и особенностей ЧСПХ, которая прогнозируется или возникла, СППР может функционировать в режимах: повседневной деятельности, повышенной готовности (при угрозе возникновения ЧСПХ) и чрезвычайной ситуации (при возникновении и ликвидации ЧСПХ). Выбор режима функционирования СППР осуществляется в подсистеме оперативного доступа.

Основными задачами СППР в режиме повседневной деятельности являются: разработка паспорта ЧСПХ, который содержит информацию о типе, объекте, территории, времени и параметрах ЧСПХ; учет потенциально опасных участков и объектов для проведения работ по предупреждению возникновения ЧСПХ; учет состава сил и средств, привлекаемых для ликвидации ЧСПХ; разработка проектов планов мобилизации сил и средств, привлекаемых для ликвидации ЧСПХ; определение потребности в финансовых

и материально-технических ресурсах.

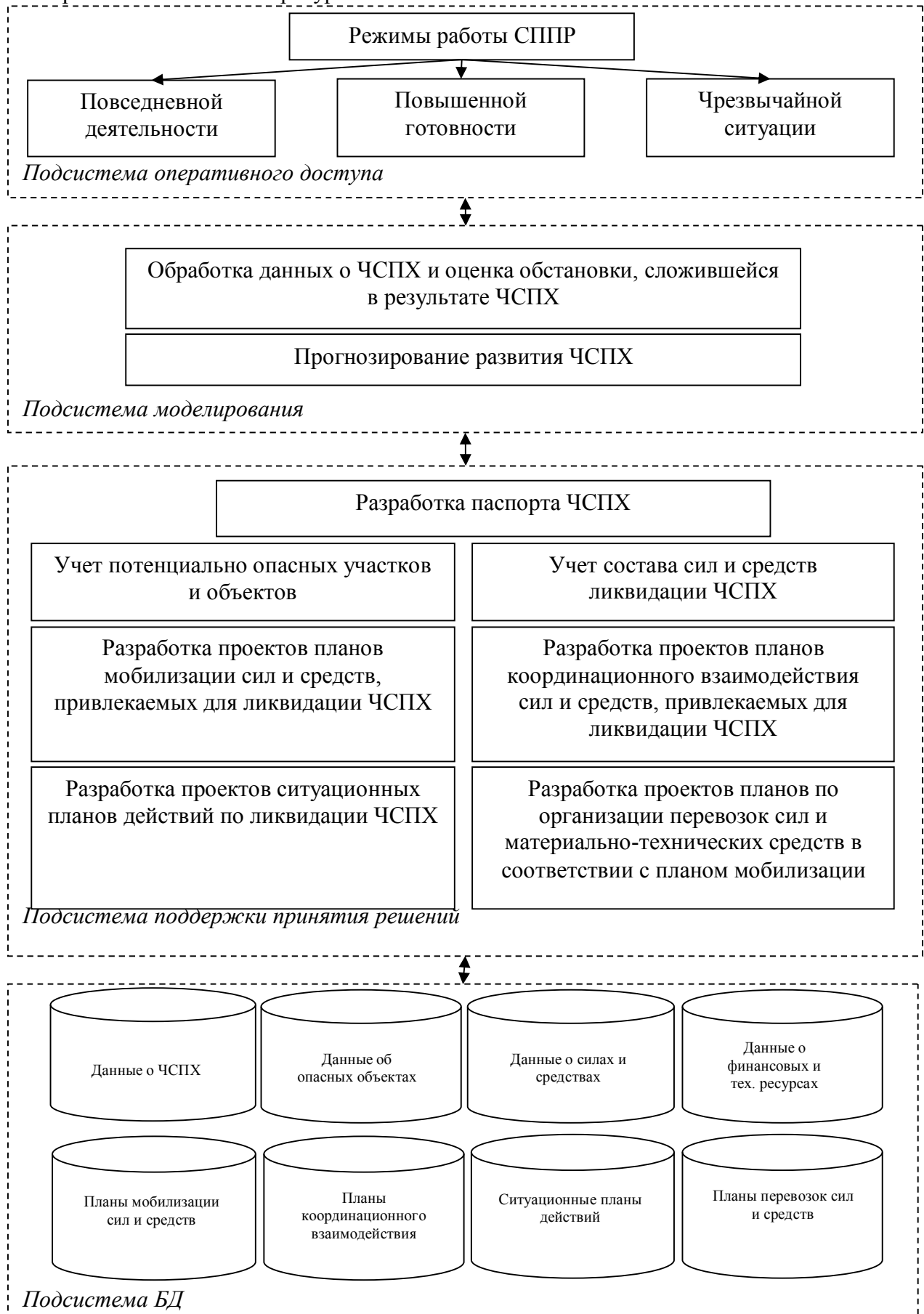


Рисунок 2 – Концептуальная структура СППР

Основными задачами СППР в режиме повышенной готовности являются: автоматизированная обработка данных о ЧСПХ и оценка обстановки, сложившейся в результате ЧСПХ; определение необходимого состава сил и средств для ликвидации ЧСПХ, сроков проведения и объема запланированных работ; расчет рационального состава сил и средств для проведения выбранных видов работ, в том числе их обеспечения (продовольственного, материально-технического, медицинского и др.).

Основными задачами СППР в режиме чрезвычайной ситуации являются: прогнозирование развития ЧСПХ; организация перевозок сил и материально-технических средств в соответствии с планом мобилизации; ликвидация последствий ЧСПХ в соответствии с разработанным планом действий.

Соответствующие функциональные возможности представлены в подсистемах моделирования и поддержки принятия решений.

Информационное обеспечение СППР представлено в виде совокупности ситуационных планов действий по ликвидации ЧСПХ, планов мобилизации и координационного взаимодействия сил и средств, привлекаемых для ликвидации ЧСПХ, а также структурированных наборов данных о ЧСПХ.

Информационное обеспечение СППР осуществляется с помощью подсистемы БД.

Назначение СППР заключается в обеспечении руководителей по ликвидации последствий ЧСПХ или ЛПР информационной поддержкой при выполнении основных задач координационного управления в условиях возникновения ЧСПХ.

Вывод. Предложена формальная модель координации действий органов управления в системе поддержки принятия решений при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного характера.

Разработка, предложенной в статье модели, позволит координировать действия привлекаемых специализированных подразделений и формирований при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций в условиях неопределенности и неполноты информации о чрезвычайных ситуациях, а также дефицита времени на принятие решений.

Показано, что координация действий в системе поддержки принятия решений может быть сведена к координации по времени, что позволяет решать задачу координации методами синхронизации по времени.

Предложена структура иерархической многоуровневой системы координационного управления в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций. Показано, что на каждом уровне могут быть выделены: координирующие органы управления и постоянно действующие органы управления.

Предложена концептуальная структура системы поддержки принятия решений при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brushlinsky N. World Fire Statistics / N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. Sokolov, P. Wagner. // Center of Fire Statistics of CTIF. – Report No. 21. – 2016. – p. 62.
2. Куликов О. М. Информационная поддержка принятия решений при ликвидации техногенных чрезвычайных ситуаций на основе моделирования сценариев управления : дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.01/ О. М. Куликов. – Уфа : Уфимский государственный авиационный технический университет, 2002. – 150 с.
3. Смирнов А. В. Подход к построению распределенной системы интеллектуальной поддержки принятия решений в открытой информационной среде / А. В. Смирнов, М. П. Пашкин, Н. Г. Шилов, Т. В. Левашова. – Труды СПИИРАН. – 2007. – Вып.4. – С. 36–49.
4. Бердашев Б. Ж. Модель адаптивной системы информационной поддержки управления ликвидацией чрезвычайных ситуаций трансграничного характера : дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.10 / Б. Ж. Бердашев. – Москва : Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2014. – 155 с.

5. Семенов А. О. Совершенствование системы управления пожарно-спасательными подразделениями при ликвидации крупных пожаров и чрезвычайных ситуаций : дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.10 / А. О. Семенов. – Москва : Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2006. – 161 с.
6. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 №5403-VI // Офіційний вісник України. – 2012. – № 89. – Ст. 3589.
7. Ходаков В. Е. О развитии основ теории координации сложных систем / В. Е. Ходаков, Н. А. Соколова, Д. Л. Кирийчук. – Проблемы информационных технологий. – 2014. – № 02 (016). – С. 12–21.
8. Шерстюк В. Г. Постановка задачи координации действий в иерархических системах управления / В. Г. Шерстюк, Е. Н. Ляшенко, Д. Л. Кирийчук // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – № 3 (54). – С. 308–312.
9. Ляшенко Е. Н. Разработка модели координации сил и средств в иерархической системе гражданской защиты населения // Е. Н. Ляшенко, В. Г. Шерстюк // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 4/2(24). – С. 4–10.
10. Телерман В. В. Удовлетворение ограничений в задачах математического программирования / В. В. Телерман, Д. М. Ушаков // Вычислительные технологии. – 1998. – Т. 3. – №2. – С.45–54.
11. Авторське право на твір UA № 69379 (2016.12). Комп'ютерна програма «Система координації дій з попередження виникнення та ліквідації надзвичайних ситуацій природного характеру «DM SYSTEM FOR CANES» / О. М. Ляшенко, Д. Л. Кирийчук. – Зареєстроване у Державній службі інтелектуальної власності України 26.12.2016.

REFERENCES:

1. N. Brushlinsky, M. Ahrens, S.Sokolov & P. Wagner (2016). World Fire Statistics, *Center of Fire Statistics of CTIF, Report No. 21*, 62.
2. A. Kulikov (2002). Informational decision support on the basis of management scenarios modeling in the course of eliminating of technogenic emergencies, *PhD Thesis, Ufa:Ufa State Aviation Technical University*, 150.
3. A. Smirnov, M. Pashkin, N. Shilov & T. Levashova (2007). An approach to building distributed intelligent support system on open information environment, *SPIIRAS Proceedings, Vol. 4*, 36–49.
4. B. Berdashev (2014). Model of adaptive management system of information of disaster management of cross-border nature, *PhD Thesis, Moscow: Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia*, 155.
5. A. Semenov (2006). Improvement of fire-rescue control system of units at eliminating of large fires and emergencies, *PhD Thesis, Moscow: Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia*, 161.
6. The Code of Civil Protection of Ukraine №5403-VI (2012). *The official journal of Ukraine, No.89, Art.3589*.
7. V.E. Khodakov, N.A. Sokolova & D.L. Kyryichuk (2014). O razvytyy osnov teoryy koordynatsyy slozhnykh system, *Problemi informaciyjnykh tekhnologiyj, 2 (016)*, 12-21.
8. V. Sherstjuk, O. Liashenko & D. Kyryichuk (2015). The problem of action coordination in a hierarchical control system, *Bulletin Kherson National Technical University, No.3(54)*, 308-312.
9. O. Liashenko & V. Sherstjuk (2015). Development of the model of forces and resources coordination in hierarchical system of civil protection, *Technology audit and production reserves, No.4/2(24)*, 4-10.
10. V. Telerman & D. Ushakov (1998). Constraint satisfaction in mathematical programming problems, *Computational technologies, Vol. 3, No. 2*, 45–54.
11. Avtorske pravo na tvir UA # 69379 (2016.12). Kompiuterna prohrama «Systema koordynatsii dii z poperedzhennia vynyknennia ta likvidatsii nadzvychnykh sytuatsii

pryrodnoho kharakteru «DM SYSTEM FOR CANES»/ O.M. Liashenko, D.L. Kyryichuk. – Zareiestrovane u Derzhavni sluzhbi intelektualnoi vlasnosti Ukrainy 26.12.2016.

Ляшенко О. М., Кирийчук Д. Л., Ложкін Р. С. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КООРДИНАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ ТА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ

У роботі розглянуто методологічні підходи до моделювання та координаційного управління в умовах виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру. Розроблено формальну модель координації дій органів управління в системі підтримки прийняття рішень при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного характеру в умовах дефіциту часу. Запропоновано структуру ієрархічної багаторівневої системи координаційного управління в умовах виникнення надзвичайних ситуацій. Виділено рівні управління системою. Показано, що на кожному рівні можуть бути виділені: координуючі органи управління і постійно діючі органи управління. Запропоновано концептуальну структуру системи підтримки прийняття рішень при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: координація дій, надзвичайні ситуації природного характеру, система координаційного управління, система підтримки прийняття рішень.

Liashenko O., Kyryichuk D., Lozhkin R. MODELING THE PROCESSES OF COORDINATION MANAGEMENT AND DECISION MAKING UNDER CONDITIONS OF NATURAL EMERGENCIES OCCURRENCE

This work presents the methodological approaches to modeling and coordination management under conditions of natural emergencies occurrence.

A formal model for coordination of activities of the management bodies in the system of decision making support for eliminating the consequences of natural emergencies under conditions of limited time is developed.

The structure of a hierarchical multi-level system of coordination management under conditions of natural emergencies occurrence is proposed. Levels of the system management are allocated. It is shown that the coordination management bodies and permanently acting management bodies can be identified at each level. The conceptual structure of the decision support system for eliminating the consequences of natural emergencies is proposed.

Keywords: coordination of actions, natural emergency situations, coordination management system, decision support system.

© Ляшенко О. М., Кирийчук Д. Л., Ложкін Р. С.

Статтю прийнято
до редакції 12.05.17

УДК 504.5:624.131

ДО ПИТАННЯ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ

Семененко М. В., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України, E-mail: mary-scorp@yandex.ru, ORCID:0000-0002-4858-4741

У статті надано результати дослідження забруднення атмосферного повітря в Київській області за роки двадцять першого століття. Ці дослідження є своєчасними і актуальними для розробки ефективних рекомендацій по зниженню антропогенного стресу в регіоні. Дослідження викидів забруднюючих речовин антропогенними джерелами було проведено в області, яка має розвинений техногенний комплекс: транспортну систему, промисловість і сільське господарство. Діяльність цього комплексу призводить до інтенсивного забруднення атмосферного повітря, яке відображається у відкритій статистичній інформації. Ця інформація носить узагальнений характер і недостатньо впливає на розробку дієвих структурованих рекомендацій. У результаті дослідження була визначена частка викидів від пересувних джерел у загальній картині забруднення. Викиди шкідливих речовин від пересувних джерел з року в рік зростають. За 15 років нашого століття ці викиди зросли більше ніж на половину, порівняно з 2000 роком. Таким чином, розробка заходів по зниженню шкідливих викидів пересувними джерелами має першочерговий пріоритетний характер.

Ключові слова: викиди забруднюючих речовин, стаціонарні джерела, пересувні джерела, аналіз, заходи.

Вступ Якісне атмосферне повітря є основою життя на планеті Земля. Але на жаль якість життєвої основи втрачається з року в рік майже у багатьох країнах світу. Так, наприклад, у 2015 році припало 93,85 кг забруднюючих речовин на одного українця [1]. Багато хто звинувачує у проблемах, які сьогодні охопили планету (головна з них – стрімке потепління клімату), науково-технічну сферу, хоча без неї якісна атмосфера неможлива. Влада багатьох країн витрачає великі кошти на пошуки альтернативних енергоносіїв, які не шкодять атмосфері. Науковці також вносять свій вклад у вирішення цієї проблеми. Пролити світло на проблеми, пояснювати їх наслідки та можливі шляхи вирішення нагальна проблема сучасності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Екологічний вплив на навколишнє середовище вивчається багатьма науковцями в різних сферах їх діяльності. Антропогенний вплив вивчається та досліджуються сучасними українськими школами Національного транспортного університету під керівництвом проф. Гутаревича Ю. Ф., Харківського автодорожного університету, де продовжується робота в напрямку зниження викидів шкідливих речовин автотранспортом, яка була розпочата відомим проф. Канило П. М. Ці школи працюють в напрямку зниження токсичності транспортних засобів. Такі вчені, як Ковальчук П. І., Биченок М. М., Зеркалов Д. В. та інші працюють в напрямку зниження токсичності промислових викидів [2–8].

Постановка проблеми Зважаючи на взаємозв'язок діяльності промисловості і транспорту досить актуальні наукові дослідження в області оптимізації спільних процесів управління викидами шкідливих речовин стаціонарними і пересувними джерелами.

Оцінка долі автомобільного транспорту в загальному викиді шкідливих речовин міста, регіону чи країни представляє самостійну складну наукову проблему.

Мета дослідження. Запропонувати напрями зниження антропогенного стресу на атмосферне повітря в досліджуваному регіоні.

Матеріали і методи дослідження. У дослідженнях були використані інформаційно-статистичні матеріали Державної служби статистики України за п'ятнадцять років [9], методи загального ступеневого аналізу, методи порівняння і групування, методи середніх величин та математичного моделювання.

Результати дослідження та їх обговорення. Дослідження сумарних викидів забруднюючих речовин від стаціонарних та пересувних джерел було проведено у типовому регіоні, який має високий рівень концентрації промислового виробництва та сільського господарства, розвинену транспортну мережу. Київщина – одна з провідних областей України. Вона розташована на півночі України у басейні середньої течії Дніпра та займає площу 28,1 тис. км² (за винятком м. Києва), що становить 4,7 % площі України (з м. Києвом – 28,9 тис. км²).

Діаграма викиду сумарних забруднюючих речовин за 2000–2014 роки побудована на підставі звітних матеріалів Департаменту екології та природних ресурсів Київської обласної державної адміністрації, а саме Регіональної доповіді «Про стан навколишнього природного середовища Київської області у 2015 році» [10].

На рис. 1. надана діаграма сумарних викидів забруднюючих речовин від стаціонарних та пересувних джерел в атмосферне повітря Київщини.

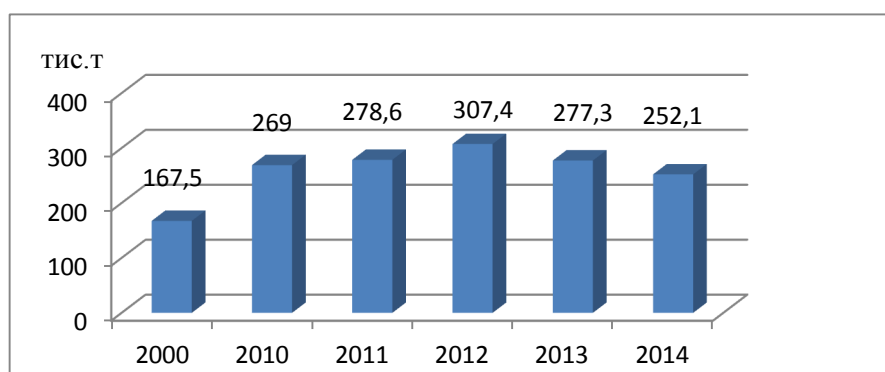


Рисунок 1 – Діаграма сумарних викидів забруднюючих речовин від стаціонарних та пересувних джерел в атмосферне повітря Київщини

Аналіз сумарних викидів забруднюючих речовин від стаціонарних та пересувних джерел Київщини за 15 років свідчить, що збільшення сумарних викидів забруднюючих речовин від антропогенних джерел викиду збільшується кожного року ХХІ століття, починаючи з 2000 року до 2012 року включно. У 2013 році зниження викидів склало 10,85 % порівняно з 2012 роком, а у 2014 зниження викидів склало 9,1 % порівняно з 2013 роком, тобто протягом останніх двох років сумарні викиди забруднюючих речовин зменшувалися у середньому на 10 % за рік.

Аналіз сумарних викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря регіону дає нам лише загальне уявлення стосовно екологічного стану. Однак це недостатньо для розробки практичних рекомендацій управління станом навколишнього середовища. Для цього треба проаналізувати джерела викидів шкідливих речовин по групах стаціонарні і пересувні.

Зважаючи на інформаційно-статистичні дані, методи математичного моделювання та програмування (SigmaPlot13Features Systat Software Inc.), було побудовано в графічному вигляді тренди викидів забруднюючих речовин окремо стаціонарними та окремо пересувними джерелами [8].

За останні п'ятнадцять років викиди забруднюючих речовин пересувними джерелами, до яких належить автотранспорт, перевищували викиди забруднюючих речовин від промислових стаціонарних джерел.

Відсоток перевищення викидів забруднюючих речовин пересувними джерелами над стаціонарними наочно показано на діаграмі (рис. 2).

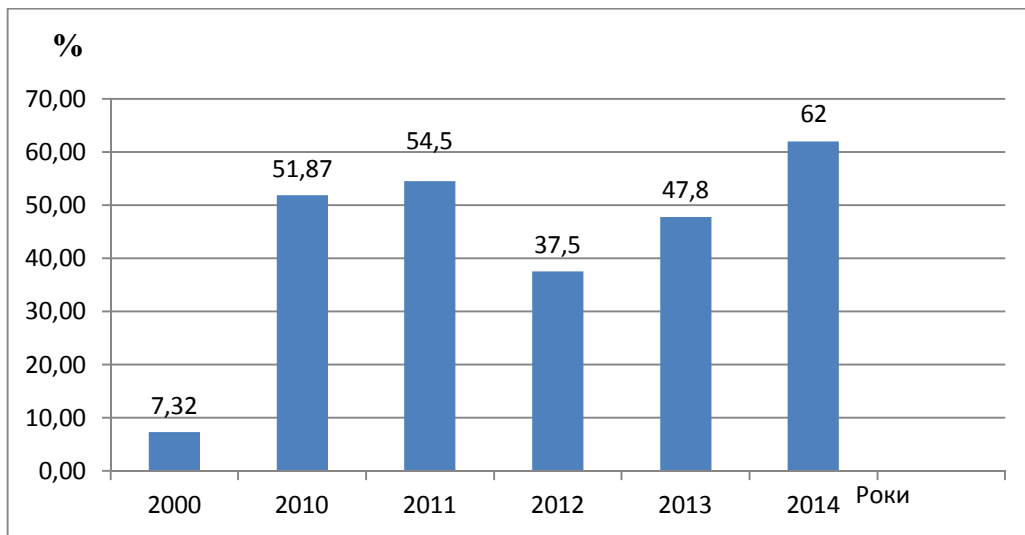


Рисунок 2 – Діаграма перевищення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря Київщини від пересувних джерел порівняно зі стаціонарними

Звісно, що на Київщині, як і в Україні в цілому, з початком військового конфлікту у промислових регіонах відбувається спад промисловості. Для Київської області спад промисловості зумовив такі фактори: як зменшення замовлення на продукцію машинобудування, скорочення експортних вантажних перевезень до Росії; встановлення обмеження на споживання енергоносіїв та інше. Але це не заважає стверджувати, що доля викидів забруднюючих речовин в загальному забрудненні атмосферного повітря від пересувних джерел за останні роки неминуче зростає.

Висновки. Аналізуючи діаграми на рис.4. приходимо до висновку, що всіма роками дослідження, викиди забруднюючих речовин від пересувних джерел перевищують аналогічні викиди від стаціонарних джерел у 2000 році на 7,32 %, а у 2014 році 62 %, тобто за 15 років викиди забруднюючих речовин від пересувних джерел збільшилися на 54,68 %.

В результаті дослідження була визначена доля викидів від пересувних джерел у загальній картині забруднення.

Викиди забруднюючих речовин від пересувних джерел з року в рік зростають. За 15 років нашого століття ці викиди зросли більше, ніж на половину, порівняно з 2000-м роком.

Таким чином, розробка заходів в напрямку зниження шкідливих викидів пересувними джерелами носить першочерговий пріоритетний характер.

Наприклад, на думку автора, треба звернути увагу, на те, що більшість транспортних засобів, які експлуатуються в державі мають двигуни внутрішнього згорання за Нормами викиду шкідливих речовин нижче Євро 6, яка останні роки діє вже у більшості сусідніх держав. В напрямку управління станом повітряного середовища одним з дієвих кроків є перехід на альтернативні види палива, в першу чергу, електромобілі та виведення з експлуатації застарілих транспортних засобів, мотивуючи наприклад на державному рівні втіленням рециклінгової системи для власника. В цьому напрямку автор продовжує подальші дослідження цієї проблеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні 2015 рік (Міністерство екології та природних ресурсів України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://menr.gov.ua>
2. Міхно М. Місце стаціонарних та пересувних джерел у забрудненні атмосферного повітря України [Текст] / М. Міхно // Вісник Центрального наукового центру транспортної академії України. – 2007. – Окремий випуск. – С. 60–63.

3. Екологія та автомобільний транспорт [Текст] / Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун та ін. – К. : Арістей, 2006. – 291 с.
4. Канило П. М. Автомобиль и окружающая среда [Текст] / Канило П. М., Бей И. С., Ровенский А. И. – Х. : Прапор, 2000. – 304 с.
5. Биченок М. М. Ризики життєдіяльності у природно-техногенному середовищі / М. М. Биченок, С. П. Іванюта, Є. О. Яковлев; Інститут проблем національної безпеки Ради національної безпеки і оборони України – К., 2008. – 160 с.
6. Семененко М. К вопросу оценки влияния автотранспортных средств на окружающую среду городов / М. Семененко // Вісник національного транспортного університету. – 2012. – № 25. – С. 326–329.
7. Семененко М. К вопросу экологической безопасности автомобильных дорог и транспорта в городах [Текст] / М. Семененко // Містобудування та територіальне планування. – 2014. – № 51. – С. 517–521.
8. Семененко М. В. Вплив забруднення атмосферного повітря антропогенними джерелами на здоров'я населення / М. В. Семененко. – К. : НУБіП, 2016. – 405 с.
9. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ukrstat.gov.ua>
10. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища Київської області у 2015 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://menr.gov.ua>

REFERENCES

1. Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Ukraini 2015rik (Ministerstvo ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy [Elektronnyi resurs] / Rezhym dostupu: <http://menr.gov.ua>
2. Mikhno M. Mistse statsionarnykh ta peresuvnykh dzherel u zabrudnenni atmosfernoho povitria Ukrainy [Tekst] /M. Mikhno // Visnyk Tsentralnoho naukovoho tsentru transportnoi akademii Ukrainy. – 2007. – Okremyi vypusk.-S.60-63.
3. Ekolohiia ta avtomobilnyi transport [Tekst] / Iu.F.Hutarevych, D.V.Zerkalov, A.H.Hovorun ta in.- K.: Aristei, 2006.- 291s.
4. Kanylo P.M. Avtomobyl y okruzhaiushchaia sreda [Tekst] / Kanylo P.M., Bei Y.S., Rovenskyi A.Y.-Kh.: Prapor, 2000.- 304 s.
5. Bychenok M.M. Ryzyky zhyttiediialnosti u pryrodno-tekhnohennomu seredovysshchi [Tekst] / M.M. Bychenok, S.P.Ivaniuta, Ie.O.Yakovliev; Instytut problem natsionalnoi bezpeky Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy -K.: 2008.- 160s.
6. Semenenko M. K voprosu otsenky vlyianyia avtotransportnykh sredstv na okruzhaiushchuiu sredu horodov [Tekst] /M. Semenenko // Visnyk natsionalnoho transportnoho universytetu. - 2012. – №25.-S.326-329.
7. Semenenko M. K voprosu ekolohycheskoi bezopasnosti avtomobylnykh doroh y transporta v horodakh [Tekst] /M. Semenenko // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. - 2014 №51.- S.517 - 521.
8. Semenenko, M.V. Vplyv zabrudnennia atmosfernoho povitria antropohennymy dzherelamy na zdorov'ia naseleння [Tekst] / M.V. Semenenko - K.: NUBiP, 2016. – 405s.
9. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: <http://ukrstat.gov.ua>
10. Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha Kyivskoi oblasti u 2015rotsi [Elektronnyi resurs] / Rezhym dostupu: <http://menr.gov.ua>

Семененко М. В. К ВОПРОСУ АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ

В статье представлены результаты исследования загрязнения атмосферного воздуха в Киевской области за годы двадцать первого века. Эти исследования являются своевременными и актуальными для разработки эффективных рекомендаций по снижению антропогенного стресса в регионе. Исследования выбросов загрязняющих веществ антропогенными источниками было проведено в области, которая имеет развитый техногенный комплекс: транспортную систему, промышленность и сельское хозяйство. Деятельность этого комплекса приводит к интенсивному загрязнению атмосферного воздуха, которое отображается в открытой статистической информации. Эта информация носит обобщенный характер и недостаточно влияет на разработку действенных структурированных рекомендаций. В результате исследования была определена доля выбросов от передвижных источников в общей картине загрязнения. Выбросы вредных веществ от передвижных источников из года в год растут. За 15 лет нашего столетия эти выбросы выросли больше чем в половину, по сравнению с 2000 годом. Таким образом, разработка мероприятий по снижению вредных выбросов передвижными источниками носит первоочередной приоритетный характер.

Ключевые слова: выбросы загрязняющих веществ, стационарные источники, передвижные источники, анализ, мероприятия

Semenenko M. TO THE QUESTION OF ANTHROPOGENIC INFLUENCE ON THE ATMOSPHERE

The article presents the results of a study of air pollution in Kyiv region for the years of the twenty-first century. These studies are timely and relevant to the development of effective recommendations for reducing the anthropogenic load in the region. A study of emissions from anthropogenic sources was conducted in the region, which has a good technological complex: transport, industry and agriculture. The activity of this complex leads to intensive pollution of atmospheric air, which is reflected in the open statistical information. This information has a general nature and does not affect the development of effective structured recommendations. The study determined the share of emissions from mobile sources in the total pollution. Emissions from mobile sources from year to year have been growing. In 15 years of this century, these emissions have grown more than in half, compared with 2000. Thus, the development of measures to reduce emissions from mobile sources is a top priority.

Keywords: pollutant emissions, stationary sources, mobile sources, analysis of the event.

© Семененко М. В.

Статтю прийнято
до редакції 02.06.17

ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ В УКРАИНЕ

Ходаков В. Е., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий Херсонского национального технического университета, e-mail: hodakov.viktor@gmail.com;

Яцюк С. В., аспирант кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, e-mail: kafedra_it@kntu.net.ua;

Якимчук Г. С., к.т.н., доцент, профессор кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета, e-mail: kafedra_ik@kntu.net.ua

Из анализа климатических условий вытекает, что территория Европы делится на две части: Западную Европу с умеренным, умеренно-морским или переходным климатом от умеренного до субтропического средиземноморского и Восточную Европу с умеренно-континентальным, более холодным и более суровым климатом.

Украина отнесена к Восточной Европе. Затраты на тепловую энергию очень большие, значительно больше, чем для стран Западной Европы. Энергоэффективность производства в Украине выше, чем в любой стране Западной Европы. Энергоемкость экономики Украины зависит от совместного влияния негативных природно-климатических факторов и использования в ее экономике устаревших технологий и оборудования 70–80-х годов прошедшего столетия. Выходом из этого критического состояния может быть использование опыта Беларуси, Финляндии и Канады, которые имеют такие же природно-климатические условия, как и Украина. Это замена технологий на более прогрессивные, менее энергозатратные и адаптированные под местные природно-климатические условия.

Ключевые слова: природно-климатические факторы (условия), энергоэффективность производства, удорожание жизни и производственной деятельности, Восточная и Западная Европа.

Введение. Человек на протяжении всей своей истории не мог существовать, не подвергаясь влиянию природно-климатических факторов (ПКФ), прежде всего климата и территории, на которой он проживал. Ландшафт, климат, продолжительность светового дня, температурный режим, плодородность почвы, доступность и обилие источников воды, полезных ископаемых, разнообразие биосферы – всё это оказывало огромное влияние, и с учетом этого в разных точках нашей планеты формировались государства, отличаясь культурой, технологическим прогрессом, бытом, физическим и интеллектуальным развитием людей. Причем, чем севернее располагалась территория проживания народа, чем дальше от морей и океанов в глубь континентов, тем более трудно и затратно было населению бороться за своё выживание с более суровыми климатическими условиями. На территориях с мягкими, теплыми климатическими условиями сформировались цивилизации вокруг Нила – Древний Египет; вокруг Средиземного моря – Древняя Греция и Римская империя; вдоль Гольфстрима и далее – Англия. Всё это были государства-империи, каждая из которых в своё время была двигателем прогресса, культуры и экономики [1, 2].

Сегодня, в век научно-технического прогресса, когда мир всё больше и больше идёт в сторону глобализации, а технологии и культура в большинстве своём стали всеобщим достоянием, быт человека меньше подвержен активному влиянию природы и климата. Но тем не менее, и сегодня мы обязаны учитывать особенности природно-климатических факторов при планировании развития общества и государства, закладывать их как неотъемлемую часть внутренней и внешней политики, стараясь максимально использовать их блага и сводить к минимуму потери от негативного воздействия. Особенно это актуально для Украины – страны Восточной Европы, которая занимает выгодное геополитическое положение, но далеко не столь хорошее географическое, и подвергается негативному влиянию природно-климатических факторов

(ПКФ) сильнее, чем страны Западной Европы. Страны Восточной Европы находятся в зоне более негативных, более холодных климатических условий. Это является одной из причин и того факта, что наша «славянская» цивилизация возникла на тысячу лет позже Эллады и в масштабах общей человеческой истории довольно молодая – первое по-настоящему большое государство – Киевская Русь, появилось лишь в IX веке.

С другой стороны, учёт ПКФ – это проблема не только отдельно взятой страны. Человечество начинает сталкиваться с проблемами сохранения биосферы и всей природной экосистемы. В погоне за бесконечным прогрессом, ростом ВВП человечество забыло об ограниченности ресурсов. Сегодня нельзя рассматривать природно-климатические факторы лишь как некую систему, которая противодействует либо помогает человеку (влияет на него), но также как систему, на которую и человек оказывает очень сильное влияние. Человечеству приходится решать новые задачи, как например восстановление природного баланса, поддержание работоспособности всей экосистемы, освоение новых, экологически безвредных источников энергии, очистка водных и земельных ресурсов, и самое сложное – изменять общемировой курс общества потребления на общество созидания [3].

Целью работы является анализ сложных социально-экономических систем регионального типа, в качестве которых рассматриваются страны, регионы Восточной Европы, характерных для них природно-климатических факторов на эффективность энергоиспользования в экономике.

Основное содержание. Исследование выполнено на примере одной из стран Восточной Европы – Украины и южных её регионов – областей.

Удаленность Украины от океанов, континентальной Евразии определяют её климат как умеренно континентальный, постепенно более негативный и более суровый, чем в Западной Европе, изменяющийся с запада на восток. Неблагоприятные климатические и погодные явления оказывают большое влияние на жизнь человека и производственно-хозяйственную деятельность в Украине, вызывая их удорожание [4, 5].

Для южных областей Украины, например, Херсонской, характерен умеренно-континентальный, засушливый климат. Среднегодовые температуры: летняя +25,4°C, зимняя – 2,1°C. Максимальная летняя температура +44°C, минимальная зимняя – 31,5°C. Длительность безморозного периода 179 дней в году, длительность отопительного периода для жилых и производственных помещений велика – 6 месяцев в году, более чем в 3 раза больше чем в Западной Европе. Потребность населения и территории в теплообеспечении напрямую зависит от климатических условий. В холодные месяцы необходима выработка огромного количества тепловой энергии как для производственных нужд, так и для поддержания локального микроклимата рабочих мест, зданий на приемлемом уровне. Отопительный период в Херсонской области начинается с момента, когда трое суток подряд средняя температура воздуха ниже 8°C. Табл. 1 отображает статистику потребления тепловой энергии, затрат на её производство в 2010–2013-х годах. Потребность в тепловой энергии с странах Западной Европы (Англия, Франция) в несколько раз ниже.

Анализируя данные табл. 1 видим, что в 1 и 4 (холодных) кварталах каждого года потребление тепла несравнимо выше, чем в 2 и 3 (тёплых) кварталах (рис. 1). Даже если сравнить наиболее затратный из тёплых кварталов – второй квартал 2012 года, и наименее холодную зиму 2013 года, в которой теплопотребление заметно ниже зим 2010–2012-х годов, разница составляет 36,70 %. Также интересно посмотреть на разницу между суровой зимой 2011 года и относительно тёплой зимой 2013-го. Она составляет 17 %.

Рассмотрим финансовую сторону сферы теплообеспечения. Сравнивая количество отпущенной энергии и денежные затраты, можно заметить, что финансовые показатели тёплых месяцев сильно разнятся с показателями потребления (рис. 2). Второй квартал 2012-го года отчается от первого 2013-го года на 51,5 %. Это очень существенная разница,

но она меньше рассчитанных 36,70 % в данных кварталах между затратами тепла. Объясняется эта особенность необходимостью поддержания тепловых комплексов в «рабочем» состоянии не только зимой, но и целый год. В период простоя денежные затраты практически не имеют «отдачи», в результате чего резко возрастает себестоимость единицы тепла, а затраты эти необходимы, поскольку без деятельности сферы теплообеспечения население и, соответственно, экономика области не сможет «выжить» в морозные холодные периоды.

Таблица 1 – Потребление тепловой энергии в Херсонской области

Квартал	Отпущено тепловой энергии (тыс.грн)	Чистый доход от реализации и услуг (тыс. грн)	Другие операционные доходы (тыс.грн)	Финансовые и другие доходы (тыс.грн)	Затраты деятельности (тыс.грн)	Финансовые результаты деятельности (тыс.грн)
Q1 2010	227,5	64129,1	5392,7	265,1	62368,8	7418,1
Q2 2010	0,4	1215,3	2455,3	367,3	13181,8	-9143,9
Q3 2010	0	59,2	7072,4	1196,5	10219,1	-1891
Q4 2010	140,4	41204,7	10962	1472,4	52533,7	1105,4
Q1 2011	236,4	65673	12392,2	205,5	80083,7	-1876
Q2 2011	0,8	1272,1	9568,7	325,6	13604,6	-2438,2
Q3 2011	0,2	942,3	13146,1	874,1	11283,7	3678,8
Q4 2011	132	48364,2	7672,8	1497,7	61307,9	-3773,2
Q1 2012	234,2	80685,3	11749,5	1507,8	94739,4	-796,8
Q2 2012	5,5	2858,6	11007,2	223,3	16117,3	-2028,2
Q3 2012	5,1	0	6903,7	947,4	13374,5	-5523,4
Q4 2012	121,5	44422,5	10320,2	372,8	58382,1	-3266,6
Q1 2013	201,9	70715,1	5233,5	1126,1	83003,5	-5928,8



Рисунок 1 – Диаграмма количества отпущенной тепловой энергии в Херсонской области



Рисунок 2 – Диаграмма затрат на обеспечение тепловой энергией

Общие затраты на обеспечение населения Херсонской области тепловой энергией за рассматриваемый период составляют 570,2 млн.грн. Эти затраты накладываются на себестоимость произведенной в области продукции, увеличивая её на налоги населения, на стоимость жизни в целом. Стоимость жизни в Восточной Европе выше, чем в Западной. С учётом возврата денег в бюджет области путём обложения налогами и поддержкой из других источников, область несет потери на предоставление услуг теплообеспечения в размере 24,4 млн.грн. Высокие затраты на обеспечение теплом населения и промышленности характерны для всех стран Восточной Европы.

Энергопотребление в странах Восточной Европы выше, чем в Западной Европе, увеличивая стоимость продукции (табл. 2) и стоимость жизни. Энергоэффективность производства в Украине, как в стране Восточной Европы выше даже, чем в других странах Восточной Европы, не говоря уже о Западной. Для подтверждения вышесказанного в табл. 2 приведены результаты обобщающей оценки влияния ПКФ в относительных единицах [4].

Повышение энергоэффективности производства является важной задачей любой страны, но важность этих задач острее чувствуется для стран Восточной Европы, стран с более негативным ПКФ [6].

Энергоемкость экономики – отношение потребленной первичной энергии (уголь, нефть, газ, электроэнергия, биотопливо) к ВВП [Кг нэ/доллар]:

$$\text{Энергоемкость} = \frac{\text{Первичная энергия}}{\text{ВВП}},$$

а энергоэффективность – это величина обратная энергоемкости:

$$\text{Энергоэффективность} = \frac{\text{ВВП}}{\text{Первичная энергия}}.$$

Если проанализировать динамику развития энергопотребления и состояния энергоэффективности производства в Украине, то реальная картина очень не радужная, т.е. у нас достаточно высокое энергопотребление, которое увеличивает стоимость производства и стоимость жизни.

Таблица 2 – Результаты обобщающей оценки влияния ПКФ на промышленное и сельскохозяйственное производство в Восточной и Западной Европе

№	Показатели	Западная Европа	Восточная Европа
1	Эффективность мясомолочного животноводства (в условных единицах)	2,36	1,0
2	Эффективность сельскохозяйственного производства (зерновых и зернобобовые культуры)	2,0	1,0
3	Удельные затраты энергии на производство пищевых продуктов	1,0	2,0 (Украина) 4,0 (Россия)
4	Базовые усредненные потребности человека (в условных единицах)	1,0	2,0
5	Издержки промышленного производства	1,0	2,6
6	Издержки строительного производства	1,0	2–3
7	Срок окупаемости предприятий (лет)	5–6	15–18
8	Энергопотребление в условных единицах (из-за длительного отопительного сезона)	1,0	3,0 (Украина) 4,0 (Россия)

Приведем энергоемкость экономики разных стран по отношению к среднемировой (средняя по миру энергоемкость ВВП = 0,20 кГн.э./\$-2000г).

Энергоемкость стран Восточной Европы, т.е. стран с негативным ПКФ более высокая, чем стран Западной Европы, США и других с более меньшими ПКФ (более «теплых» стран).

Из приведенных данных (рис. 3) видно, что Украина относится к странам с самой высокой энергоемкой экономикой. Высокая энергоемкость экономики страны определяется прежде всего негативными ПКФ, а также массовым использованием технологий и оборудования (70–80-х годов XX столетия). Поэтому решение проблемы повышения энергоэффективности экономики стран Восточной Европы и, прежде всего, Украины имеет более важное значение, чем для стран Западной Европы. И здесь необходимо использовать все возможные пути её решения, чтобы парировать негативное проявление климатических факторов.

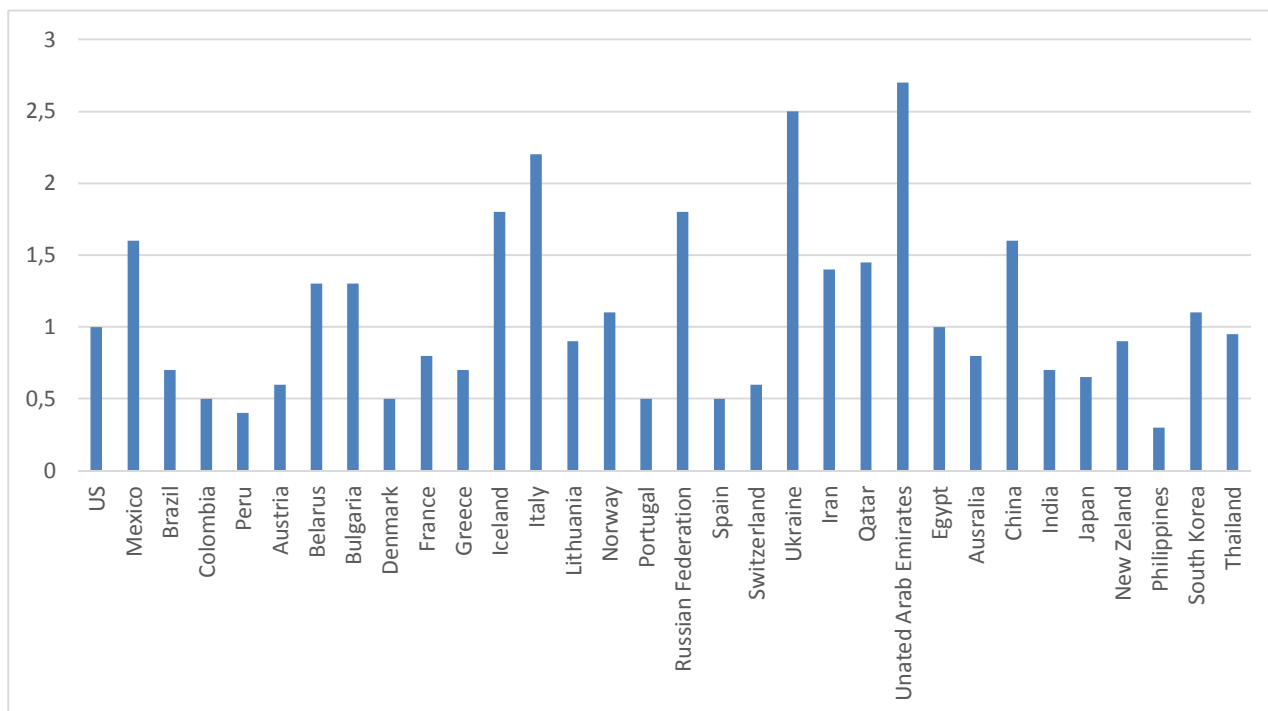


Рисунок 3 – Энергоемкость стран в мире

Обратим внимание еще на один фактор – более широкое использование компьютерных систем для управления энергоресурсоэффективностью предприятий для решения задач управления и мониторинга энергоресурсоэффективности сложных систем. Особенно это актуально для успешной реализации энергоэффективных технологий в условиях Восточной Европы, а следовательно, и Украины с негативным ПКФ.

Несмотря на то, что компьютерное оборудование использует электрическую и тепловую энергию, они сами должны обладать свойствами энергоэффективности и быть экологически безвредными устройствами. Повышение эффективности эксплуатации компьютерных систем представляет важность не только для Украины, но и большинства стран мира. Несмотря на то, что сами компьютеры относятся к классу достаточно энергоэффективных средств, но их массовость, а в эксплуатации в мире находится более 2,5 млрд. компьютеров, все это приводит к общим большим затратам энергии.

Поэтому производители компьютерных систем используют различные решения в области эффективной стратегии для решения вопросов энергопотребления.

Одним из направлений является создание зеленых компьютеров, т.е. компьютеров с минимальным потреблением энергии, например, ноутбуки серии Есс PC, OLPC, Classmate PC, Green gPC. Украине следует перенимать опыт соседа – Белоруси, которая сумела повысить энергоэффективность производства, намного опередить современную Украину в развитии, несмотря на то, что характеризуется более скромными природными ресурсами и более суровым климатом.

В Беларуси после 1990-го года за период 1990–2008 гг. энергоемкость валового внутреннего продукта снизилась более чем в 2,8 раза. Такие весомые результаты в повышении эффективности энергоиспользования достигнуты в большей степени благодаря сложившемуся в республике системному подходу к работе по энергосбережению [7].

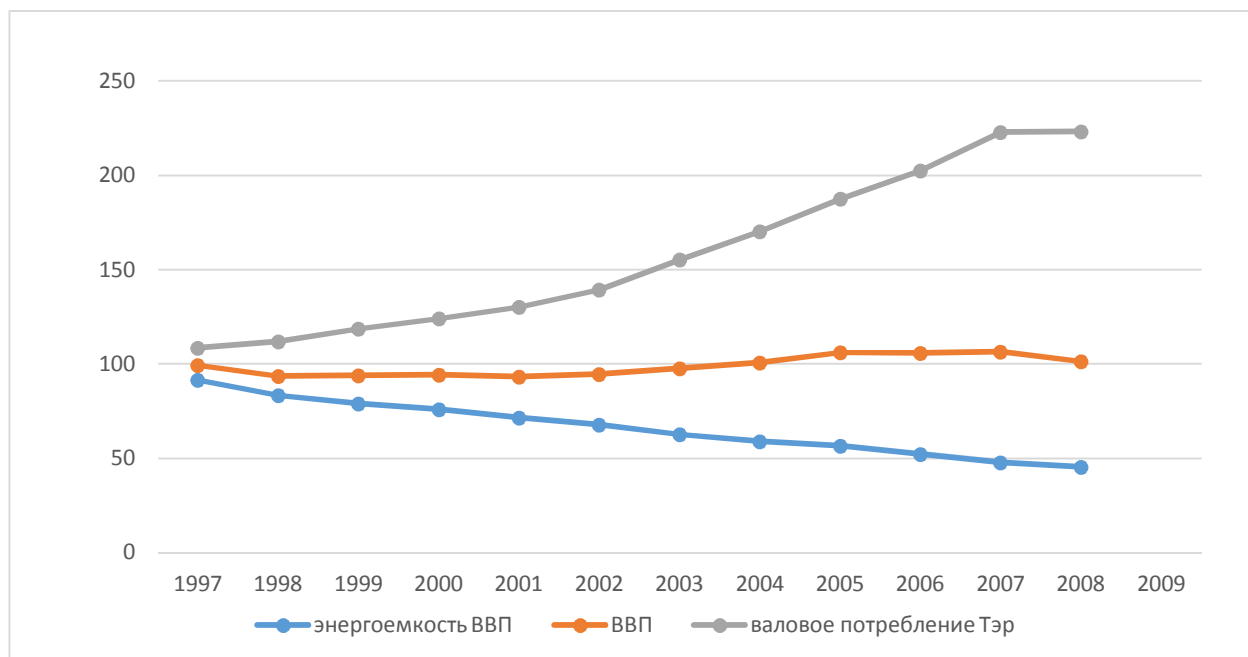


Рисунок 4 – Динамика ВВП, валового потребления ТЭР и энергоёмкости в 1997–2009-го годах (%) в Республике Беларусь

По состоянию на начало 2016-го года энергоемкость ВВП в Беларуси составляла 190 килограммов нефтяного эквивалента (н. э.) на 1 тысячу долларов. Согласно данным Международного энергетического агентства (МЭА), тот показатель соответствует уровню Финляндии и Канады [8]. При этом, мы не должны забывать, что негативность природно-климатических факторов Беларуси примерно соответствует негативным ПКФ Канады и Финляндии.

Чтобы достичь положительных результатов в снижении энергоемкости ВВП, нужны крупные капитальные вложения. В 2001–2008 гг. общий объем финансирования мероприятий в сфере повышения энергоэффективности экономики Беларуси и увеличение использования собственных энергоресурсов составил по всем источникам 3865,8 млн. долл. США. Изменилась структура и качественный состав мероприятий, теперь это, как правило, реконструкция действующих мощностей с заменой технологий и оборудования на современное – более мощное и работающее с меньшим удельным расходом топлива на производство 1 кВт·ч электроэнергии или 1 Гкал/ч тепла, строительство новых электростанций и теплоцентралей, использование новейших технологий подачи и сжигания топлива и др. До 2009 г. реализация мероприятий программ энергосбережения осуществлялась в основном за счет собственных средств организаций, кредитных ресурсов банков, средств республиканского и местных бюджетов. Удельный вес этих источников в общем объеме финансирования составил в сумме 91,0%. Финансирование за счет средств инновационных фондов, образуемых органами государственного управления практически не осуществлялось. Кроме того, в Беларуси увеличивается объем инвестиций в энергосбережение. Если в 2001 г. в экономию одной тонны топлива вкладывалось примерно 100 долл. США, то в 2009 г. этот показатель достиг 726 долл. США [9].

Внедрение новых технологий, современных средств производства, оборудования, уменьшение потребления природных ресурсов при увеличении количества получаемой продукции, бережное отношение к экологии – это реальные задачи, которые под силу выполнять не только ведущим странам Западной Европы с их развитой экономикой, но и странам постсоветского пространства. Приведем для сравнения данные по энергоемкости ВВП Украины и Беларуси.

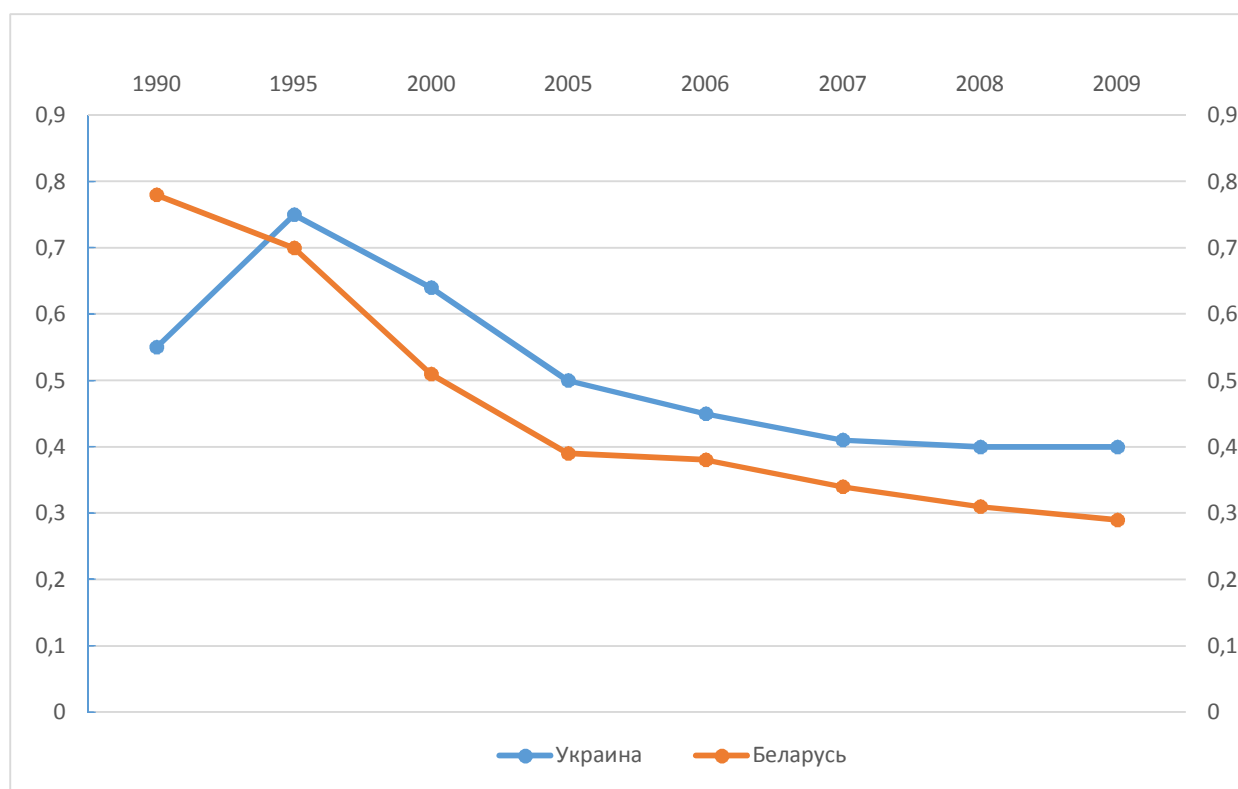


Рисунок 5 – Энергоемкость ВВП Украины и Беларуси в 1990–2009-х годах

К сожалению, достоверных данных по Украине после 2010 года найти не удалось, но учитывая устаревание промышленных мощностей и сектора ЖКХ в нашей стране, практически полное отсутствие мероприятий по модернизации производства и ремонту жилищного сектора, можно предположить, что положительных изменений в тенденции снижения энергоемкости ВВП Украины мало, и на сегодняшний день разница между Украиной и Беларусью (которая на начало 2016-го года имела показатель энергоемкости

0,19 тонн на 1 тыс. долл.) еще более усугубилось, а отставание от стран Западной Европы и вовсе катастрофическое.

Заключение. Несмотря на то, что Украина является самой южной и теплой территорией Восточной Европы, затраты на обеспечение тепловой энергией велики, как и длителен морозный период. Энергоэффективность производства Украины является более высокой, чем в Западной Европе и даже выше, чем в остальных странах Восточной Европы. Энергоемкость экономики Украины является одной из самых высоких в мире. Высокая энергоемкость экономики Украины определяется совместным воздействием негативных природно-климатических факторов и использованием устаревших технологий и оборудования (70–80-х годов прошлого столетия).

Выходом из этого критического состояния, как показывает опыт стран с такими же или более негативными ПКФ, как Беларуси, Финляндии, Канады является замена технологий на более прогрессивные, менее энергозатратные и адаптированные под местные ПКФ, замена оборудования на современное, более мощное и работающее с меньшими удельными расходами топлива и сырья.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гумилев Л. Н. Этногенез и биосфера Земли / Л. Н. Гумилев. – Д ДК, 1994. – 638 с.
2. Гумилев Л. Н. От Руси до России / Л. Н. Гумилев. – М. : АСТ, 2006. – 416 с.
3. Моисеев Н. Н. С мыслями о будущем / Н. Н. Моисеев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.Vabloko.ru/union/MPUA/Moiseev.html
4. Ходаков В. Е. Природно-климатические факторы и социально-экономические системы : монография / В. Е. Ходаков, Н. А. Соколова – Херсон : Изд-во ХГМА, 2016. – 604 с.
5. Паршев А. П. Почему Россия не Америка / А. П. Паршев // Крымский форум. – 2001. – 416 с.
6. Зенькевич Ж. З. Энергетический сервис в странах СНГ / Ж. З. Зенькевич // Материалы международного энергетического форума. – Алушта, 2012. – 217 с.
7. Кривонос Ю. Е. Экономическая теория : конспект лекций / Ю. Е. Кривонос. – Таганрог : Изд. ТРТИ ЮФУ.
8. Информационный электронный журнал «Энергосвет» №7 (127, 2010)
9. Нефть России : информационно-аналитический журнал. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://www.oilru.com/>

REFERENCES

1. Gumilev L. N. Ehtnogenez i biosfera Zemli / L. N. Gumilev. – D DK, 1994. – 638 s.
2. Gumilev L. N. Ot Rusi do Rossii / L. N. Gumilev. – M. : AST, 2006. – 416 s.
3. Moiseev N. N. S mihslyami o buduthem / N. N. Moiseev [Ehlektronnihyj resurs]. – Rezhim dostupa: www.Vabloko.ru/union/MPUA/Moiseev.html
4. Khodakov V. E. Prirodno-klimaticheskie faktorih i socialjno-ehkonomicheskie sistemih : mnografiya / V. E. Khodakov, N. A. Sokolova – Kherson : Izd-vo KhGMA, 2016. – 604 s.
5. Parshev A. P. Pochemu Rossiya ne Amerika / A. P. Parshev // Krihmskiyj forum. – 2001. – 416 s.
6. Zenjkevich Zh. Z. Ehnergeticheskiyj servis v stranakh SNG / Zh. Z. Zenjkevich // Materialih mezhdunarodnogo ehnergeticheskogo foruma. – Alushta, 2012. – 217 s.
7. Krivonos Yu. E. Ehkonomicheskaya teoriya : konspekt lekciyj / Yu. E. Krivonos. – Taganrog : Izd. TRTI YuFU.
8. Informacionnihyj ehlektronnihyj zhurnal «Ehnergosvet» №7 (127, 2010)
9. <http://www.oilru.com/> / Informacionno – analiticheskiyj zhurnal «Neftj Rossii»

Ходаков В. Е., Яцюк С. В., Якимчук Г. С. ОСОБЛИВОСТІ ПРИРОДНО-КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ ТА РОЗВИТОК ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УКРАЇНІ

Із аналізу кліматичних умов витікає, що територія Європи поділяється на дві частини: Західну Європу з помірним, помірно-морським або перехідним кліматом від помірного до субтропічного середземноморського та Східну Європу з помірно-континентальним, холоднішим та суворішим кліматом.

Україна віднесена до Східної Європи. Витрати на теплову енергію дуже великі, значно більші, ніж для країн Західної Європи. Енергоефективність виробництва в Україні вища, ніж в будь-якій країні Західної Європи. Енергоємність економіки України залежить від сукупного впливу негативних природно-кліматичних факторів та використання в її економіці застарілих технологій та устаткування 70-80-х років минулого століття. Виходом з цього критичного стану може бути використання досвіду Білорусі, Фінляндії та Канади, які мають такі ж природно-кліматичні умови, як і Україна. Це заміна технологій на прогресивніші, менш енерговитратні та адаптовані під місцеві природно-кліматичні умови.

Ключові слова: *природно-кліматичні фактори (умови), енергоефективність виробництва, подорожчання життя та виробничої діяльності, Східна та Західна Європа.*

Khodakov V. E., Yatsiuk S. V., Yakimchuk G. S. THE FEATURES OF NATURAL AND CLIMATIC FACTORS AND DEVELOPMENT OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES IN UKRAINE

From the analysis of the climatic conditions it follows that the territory of Europe is divided into two parts: Western Europe with mild, temperate marine or a transitional climate ranging from temperate to subtropical Mediterranean and Eastern Europe with temperate, more cold and rigorous climate.

Ukraine is related to Eastern Europe. The cost of thermal energy is very large, much larger than for Western European countries. The energy efficiency of production in Ukraine is higher than in any country in Western Europe. The energy intensity of the Ukrainian economics depends on the combined effects of adverse climatic factors and use in the economics of obsolete technologies and equipment of 70-80 of the last century. The way out of this critical state can be the use of the experience of Belarus, Finland and Canada, which have the same climatic conditions, as well as Ukraine. This is the replacement technology for more advanced, less energy-intensive and adapted to the local climatic conditions.

Keywords: *climatic factors (conditions), energy efficiency of production, increased cost of living and production activities, Eastern and Western Europe*

© Ходаков В. Е., Яцюк С. В., Якимчук Г. С.

Статтю прийнято
до редакції 24.03.17

УДК 667.64:678.026

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ ПАРААМІНОАЗОБЕНЗОЛОМ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Ходаковський О. В., к.т.н., доцент кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: dzgeron@rambler.ru;

Амелін М. Ю., аспірант кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: dzgeron@rambler.ru;

Букетова Н. М., к.т.н., науковий співробітник наукової групи при кафедрі транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua;

Сапронов О. О., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: o.o.sapronov@gmail.com;

Яцюк В. М., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua

У роботі для формування композитних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і модифікатор. Досліджено залежність вмісту модифікатора на фізико-механічні властивості епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліішеними когезійними властивостями оптимальний вміст модифікатора парааміноазобензолу становить $q = 1,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються підвищеною механічною міцністю і здатністю чинити опір статичним, динамічним, а також навантаженням ударного характеру, позаяк показники їх властивостей становлять: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_z = 51,8$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 3,9$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 11,9$ кДж/м². Отримані результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей композитних матеріалів добре узгоджуються з результатами випробувань зразків методом оптичної мікроскопії, що свідчить про їх достовірність.

Ключові слова: епоксидний композит, модуль пружності, ударна в'язкість, руйнівні напруження при згинанні.

Постановка проблеми. Як відомо [1, 2], важливе значення при експлуатації і ремонті засобів транспорту, у тому числі й річкового та морського, має застосування полімерних композитних матеріалів (КМ) та захисних покриттів на їх основі. У першу чергу, актуальними є питання, що стосуються підвищення надійності роботи й відповідно експлуатаційних характеристик елементів технологічного обладнання, які піддаються статичним та динамічним навантаженням, що є першопричиною їх зношування і корозії. Широкий спектр зовнішніх та внутрішніх факторів, які впливають на характеристики структури деталей, і, як наслідок, визначають їх надійність, передбачає використання нових матеріалів, що відзначаються комплексом підвищених характеристик. До цього класу відносять полімерні композити. Перспективою використання таких матеріалів є можливість їх застосування у критичних умовах експлуатації деталей та механізмів, що є важливим і актуальним при ремонті засобів морського та річкового транспорту в умовах рейсу. Доведено [3], що такі композити не лише є перспективними з технологічної точки зору (можливість формування і нанесення на поверхні деталей за підвищеної вологості та градієнту температур), але й відзначаються екологічністю та підвищеними експлуатаційними характеристиками у критичних умовах роботи засобів транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний науковий і практичний досвід у напрямку дослідження фізико-механічних властивостей КМ висвітлено у працях авторів: Ю.С.Ліпатова, А.В.Букетова, П.Д.Стухляка, О.В.Шарка, О.М.Сизоненко, Г.М.Бартенева, Г.А.Баглюка та ін. Зазначеними вище науковцями доведено, що важливим при формуванні композитів є не лише встановлення критичного вмісту добавки, але й вибір хімічно та фізично активного наповнювача чи модифікатора, що дозволяє збільшити

ступінь зшивання нових матеріалів. При цьому важливе значення має підхід до контролю швидкості перебігу фізико-хімічних процесів міжфазової взаємодії при структуроутворенні полімерних композитів. Останнє суттєво залежить від активності до створення міжфазових зв'язків введеної добавки. Виходячи з цього, актуальним є введення у полімерний зв'язувач модифікаторів за незначного вмісту, що дозволить отримати матеріали із наперед заданою структурою і відповідно поліпшеними когезійними властивостями.

Мета роботи – дослідити вплив вмісту модифікатора парааміноазобензолу на фізико-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 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 [4, 5], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як модифікатор використано парааміноазобензол (ПААБ). Хімічна формула парааміноазобензолу має наступний вигляд: $C_{12}H_{11}N_3$. Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна маса парааміноазобензолу – 197. Температура плавлення – 400 К. Модифікатор розчинний у бензолі, етанолі, ацетоні, малорозчинний у воді. Використовується як азобарвник та синтон для одержання більш складних азобарвників.

Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача

<i>Характеристики</i>	<i>Епоксидний олігомер ЕД-20</i>	<i>Модифікатор ПААБ</i>	<i>Твердник ПЕПА</i>
Молекулярна маса	390...430	197	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–	–
Середня функціональність за епоксидними групами, f_n	2,0	–	–
Вміст азоту, %	–	21,32	19,5...22,0
Вміст вуглецю, %	–	73,10	–
Вміст водню, %	–	5,58	–
В'язкість, η , Па·с	13...20	–	0,9
Густина, ρ , г/см ³	1,16	–	1,05

Епоксидні композити формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомеру й модифікатора впродовж часу $\tau = 1 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання 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 за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні, ударну в'язкість.

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.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з такими параметрами: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$ мм. Відстань між опорами $40 \pm 0,5$ мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Результати досліджень та їх обговорення. Попередньо експериментально досліджено фізико-механічні властивості модифікованої ультразвуковою обробкою вихідної епоксидної матриці. Доведено (рис. 1), що показники її характеристик є наступними: модуль пружності при згинанні – $E = 2,8$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{ze} = 48,0$ МПа, ударна в'язкість – $W = 7,4$ кДж/м².

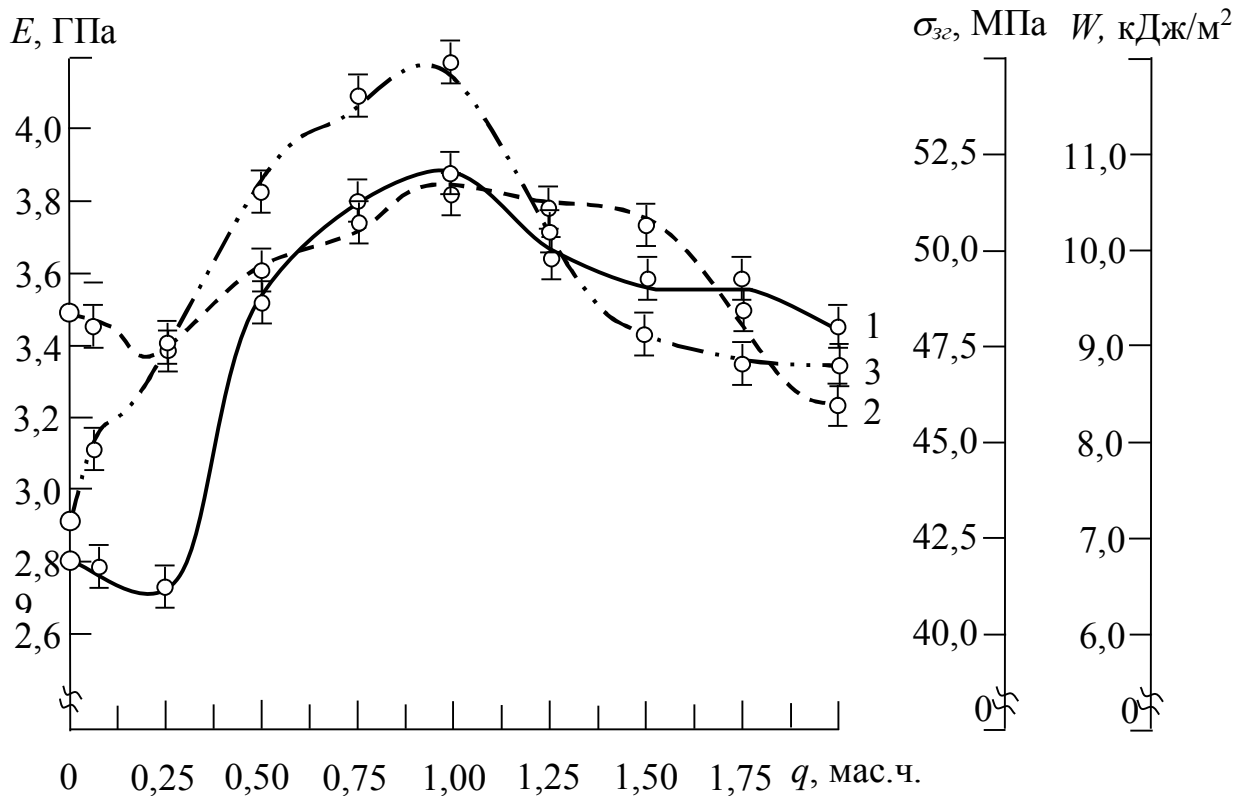


Рисунок 1 – Залежність фізико-механічних властивостей і ударної в'язкості епоксидної матриці від вмісту модифікатора парааміноазобензолу:

1 – модуль пружності при згинанні (E); 2 – руйнівні напруження при згинанні (σ_{ze}); 3 – ударна в'язкість (W , кДж/м²)

Надалі досліджували залежність фізико-механічних властивостей КМ від вмісту модифікатора парааміноазобензолу. Встановлено (рис. 1, крива 1), що введення модифікатора у кількості $q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. не приводить до зміни модуля пружності епоксидної матриці, позаяк значення даної характеристики становлять $E = 2,6 \dots 2,8$ ГПа (це відноситься до діапазону значень, які знаходяться в межах похибки експерименту). Подальше збільшення вмісту ПААБ до $q = 0,50 \dots 0,75$ мас.ч. забезпечує збільшення показників модуля пружності матриці до $E = 3,5 \dots 3,7$ ГПа. Це можна пояснити

активацією процесів фізико-хімічної взаємодії груп модифікатора ($-\text{NH}_2$ -, $\text{C}=\text{C}$) з сегментами та боковими групами епоксидного олігомеру ($\text{C}=\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$, $-\text{C}-\text{H}$ -, $-\text{C}-\text{CH}_2$, $\text{C}-\text{OH}$) під час структуроутворення КМ. Слід зазначити, що на початковому етапі зшивання КМ попередньо проводили УЗО композиції. Це забезпечує не лише її дегазацію та інтенсивне перемішування компонентів до введення твердника, але й активує макромолекули інгредієнтів до подальшої взаємодії. Припускали, що в результаті УЗО активація відбувається за рахунок зміщення електронної густини у ковалентних зв'язках як епоксидного олігомеру, так і модифікатора. Це, у свою чергу, забезпечує збільшення їх реакційної здатності. У результаті перебігу таких процесів взаємодії підвищується кількість фізичних зв'язків на початковому етапі зшивання КМ (за температур до точки склування) і хімічних зв'язків у діапазоні температур $\Delta T \approx 400 \dots 450 \text{ K}$. Такі процеси створюють умови для формування матеріалів з підвищеними показниками когезійної міцності, що передбачає відповідно підвищення значень модуля пружності модифікованої матриці у тому числі.

Максимальне значення модуля пружності при згинанні ($E = 3,9 \text{ ГПа}$) спостерігали при введенні модифікатора ПААБ за вмісту $q = 1,00 \text{ мас.ч.}$ Вважали, що за такого критичного вмісту добавки у композиті утворюється максимальна кількість хімічних зв'язків і формується матеріал з найвищим ступенем зшивання серед усього досліджуваного діапазону КМ. При цьому на кінцевому етапі зшивання утворюється композит з гомогенною структурою, яка відзначається рівномірним розподілом зв'язків у об'ємі, що передбачає не лише поліпшення когезійних властивостей, але й зниження залишкових напружень [6]. Останнє є важливим для підвищення надійності експлуатації розроблених матеріалів у критичних умовах (знакозмінні навантаження і широкий градієнт температур).

Надалі збільшення вмісту модифікатора ($q = 1,25 \dots 2,00 \text{ мас.ч.}$) призводить до зменшення показників модуля пружності при згинанні до $E = 3,5 \dots 3,7 \text{ ГПа}$. На наш погляд, це зумовлено надмірною кількістю молекул модифікатора у композиціях, що зумовлює неповне їх зшивання при полімеризації. Такі матеріали відзначаються підвищеним вмістом золь-фракції, що призводить до зниження показників фізико-механічних характеристик розроблених матриць.

На наступному етапі аналізували залежність руйнівних напружень при згинанні КМ від концентрації модифікатора. Експериментально встановлено (рис. 1, крива 2), що введення у зв'язувач ПААБ за незначного вмісту ($q = 0,10 \dots 0,50 \text{ мас.ч.}$) не приводить до підвищення показників когезійної міцності матеріалів, оскільки значення руйнівних напружень вихідної ($\sigma_{32} = 48,0 \text{ МПа}$) і модифікованих добавкою матриць ($\sigma_{32} = 47,0 \dots 49,0 \text{ МПа}$) практично не відрізняються. Доведено (рис. 1), що максимум ($\sigma_{32} = 51,8 \text{ МПа}$) на кривій залежності руйнівних напружень при згинанні від вмісту модифікатора спостерігали за концентрації добавки $q = 1,00 \text{ мас.ч.}$ Отримані дані симбатно корелюють з аналогічною залежністю модуля пружності при згинанні від вмісту ПААБ (рис. 1, крива 1), де аналогічно виявлено максимальні показники E за такої ж кількості введеної добавки. Більше того, при введенні модифікатора понад критичного вмісту ($q = 1,25 \dots 2,00 \text{ мас.ч.}$) показники руйнівних напружень суттєво знижуються до $\sigma_{32} = 45,8 \dots 50,1 \text{ МПа}$. Отримані результати дослідження підтверджують наведені вище припущення про те, що введення у зв'язувач залишкової кількості модифікатора призводить до суттєвого погіршення когезійних властивостей матриці за рахунок збільшення золь-фракції у матеріалі.

Враховуючи те, що устаткування річкового та морського транспорту експлуатують при динамічних і ударних навантаженнях, актуальним було проведення дослідження ударної в'язкості розроблених композитів, які додатково можна використовувати у вигляді захисних покриттів під час ремонту деталей механізмів та машин. Експериментально доведено (рис. 1, крива 3), що розроблені матеріали є стійкими до ударних навантажень, оскільки введення у епоксидний олігомер ЕД-20 модифікатора ПААБ за незначного вмісту ($q = 1,00 \text{ мас.ч.}$ – максимум на кривій залежності ударна

в'язкість (W) – вміст модифікатора (q) забезпечує підвищення показників міцності при ударі стосовно вихідної матриці у 1,6 разів (від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 11,9$ кДж/м²). Надалі збільшення концентрації модифікатора у епоксидному композиті до $q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч. призводить до зменшення показників ударної в'язкості, які знаходяться в межах $W = 8,9 \dots 9,2$ кДж/м². Слід зазначити – отримані дані корелюють і добре узгоджуються з результатами дослідження залежності модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні, що свідчить про достовірність отриманих показників в результаті проведених випробувань комплексу фізико-механічних властивостей матеріалів.

Додатково для підтвердження отриманих результатів випробувань проводили аналіз поверхні руйнування зразків після їх дослідження на маятниковому копрі. Методом оптичної мікроскопії встановлено (рис. 2, а), що поверхня зламу вихідної матриці має квазіоднорідний характер, проте у зразку встановлено наявність мікротріщин (рис. 2, б). Це свідчить про наявність локальних залишкових напружень в матеріалі. Консольним методом [6] встановлено, що величина залишкових напружень в епоксидній матриці становить $\sigma_3 = 1,4$ МПа. Необхідно також відзначити зигзагоподібний характер поширення тріщини, який вказує на зміну знаку коефіцієнта інтенсивності напружень. Після стрибка тріщини шлях її поширення вирівнюється, змішана мода деформації змінюється деформацією нормального відриву, що особливо помітно на кінцевій стадії руйнування.

Слід зазначити, що для зразків з модифікованою епоксидною матрицею, яка містять ПААБ у кількості $q = 0,25$ мас.ч., спостерігали прямий характер зламу (рис. 2, в, г). Це свідчить про незначні когезійні властивості такого композиту, оскільки тріщина, що виникає під час удару маятникового копра, поширюється прямо. Сіткова структура хімічних зв'язків у такому матеріалі не є однорідною, свідченням чого є наявність вкраплення у об'ємі зразка, який характеризує розрихлення структури КМ (рис. 2, г).

Навпаки, для зразків з модифікованих матриць, які містять ПААБ у кількості $q = 0,50$ мас.ч. (рис. 2, д, е) і $q = 1,00$ мас.ч. (рис. 2, є, ж), спостерігали хвилеподібний характер макрозламу. Можна констатувати про формування складного напруженого стану в КМ, свідченням чого є утворення трьох фрагментів сколювання під час руйнування зразка при ударі. Дані композити відзначаються найвищими показниками модуля пружності і ударної в'язкості, що дозволяє стверджувати про значну кількість хімічних зв'язків у структурній сітці КМ, а, отже, й поліпшені їх когезійні властивості. Крім того, слід зауважити, що після удару тріщини поширюються нерівномірно, а хімічні зв'язки, наявні в матеріалі після його структуроутворення, чинять опір руйнуванню, внаслідок чого тріщини набувають розгалуженого характеру (показано стрілками, рис. 2, е). Слід зауважити і акцентувати увагу на хвилеподібному характері поширення фронту тріщини (показано стрілками) при руйнуванні зразка модифікованої матриці з добавкою у кількості $q = 1,00$ мас.ч. (рис. 2, є, ж). Підтверджено, що такий матеріал відзначається високими показниками когезійної міцності, а це обумовлює значну енергоємність його деформування і руйнування. Додатково встановлено [6], що величина залишкових напружень при введенні в епоксидний олігомер модифікатора за даного вмісту зростає до $\sigma_3 = 3,5$ МПа. Це свідчить про формування напруженого стану в КМ за рахунок значної інтенсивності структуроутворення полімеру і формування композиту з високим ступенем зшивання.

Додатково за допомогою макро- і мікроаналізу встановлено, що руйнування КМ з ПААБ у кількості $q = 1,50$ мас.ч. відбувається практично перпендикулярно поздовжньої осі зразків (рис. 2, з, і). Поверхня зламу таких зразків має квазікрихкий характер, що свідчить про рівномірність розподілу модифікатора в об'ємі матеріалу. У зразках відсутні лінії сколювання, оскільки система знаходиться в кінетично і термодинамічно стабільному стані. Можна констатувати, що в таких КМ формується сіткова структура з рівномірним розподілом хімічних зв'язків, але із невеликою їх густиною у об'ємі матеріалу. Це, у першу чергу, зумовлено надмірною кількістю модифікатора у системі.

Отже, енергоємність ударного руйнування таких зразків не є високою, що підтверджено характером зламу досліджуваного матеріалу.

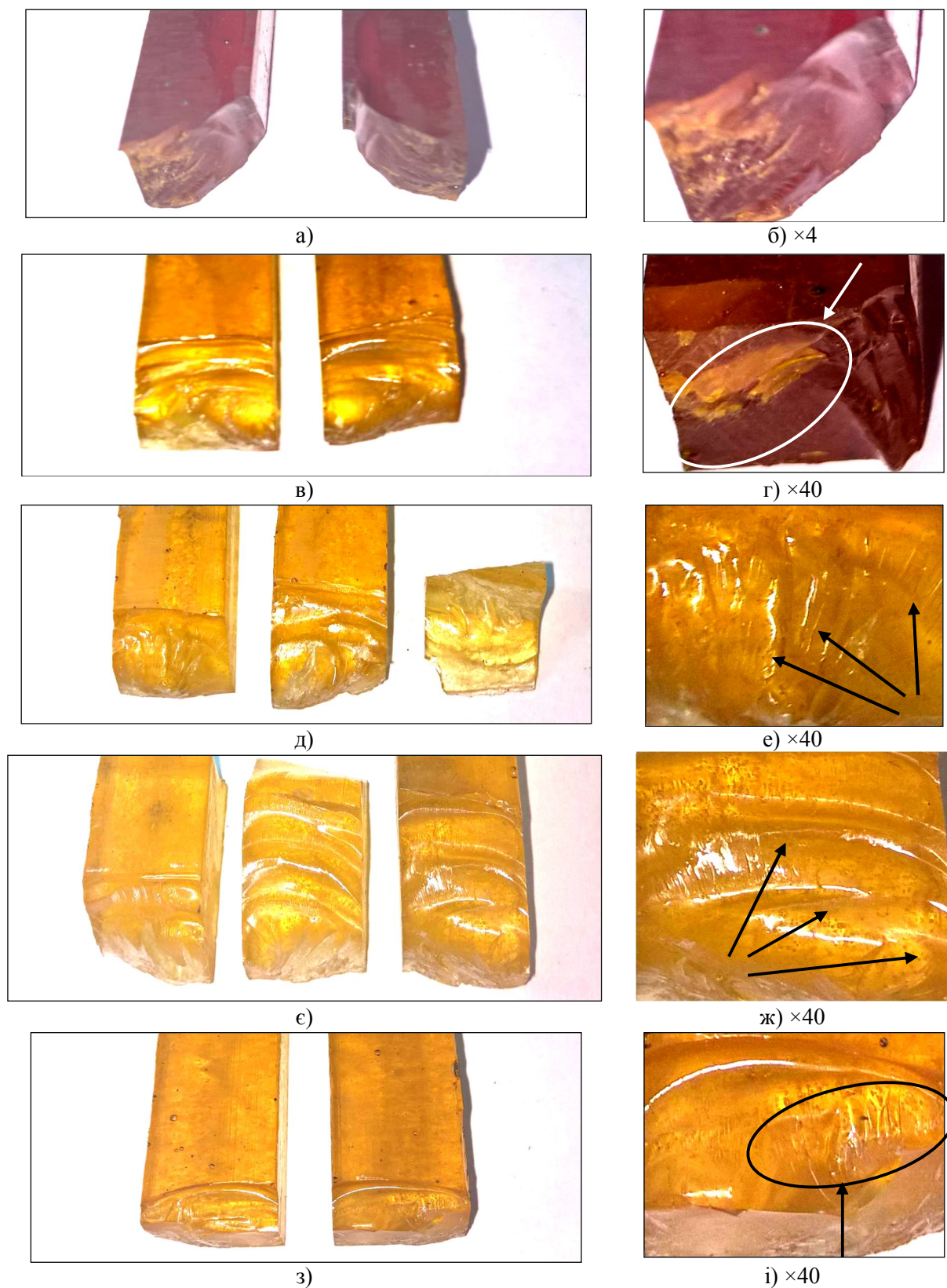


Рисунок 2 – Мікросвітлини зламу вихідної і модифікованих парааміноазобензолом епоксидних матриць:

а, б) вихідна епоксидна матриця (контрольний зразок); в, г) $q = 0,25$ мас.ч. модифікатора; д, е) $q = 0,50$ мас.ч. модифікатора; є, ж) $q = 1,00$ мас.ч. модифікатора; з, і) $q = 1,50$ мас.ч. модифікатора

Висновки. У роботі встановлено:

1. Експериментально доведено, що для формування матеріалів з поліпшеними когезійними властивостями необхідно використовувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), модифікатор парааміноазобензол ($q = 1$ мас.ч.). Такий матеріал відзначається наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{зг} = 51,8$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 3,9$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 11,9$ кДж/м².

2. Методом оптичної мікроскопії встановлено, що поверхня зламу вихідної матриці має квазіоднорідний характер, проте у зразку встановлено наявність мікротріщин. Це свідчить про наявність локальних залишкових напружень у матеріалі. Для зразків з модифікованих матриць, які містять модифікатор у кількості $q = 0,50$ мас.ч. і $q = 1,00$ мас.ч., спостерігали хвилеподібний характер макрозламу. При руйнуванні зразків тріщини поширюються нерівномірно, а хімічні зв'язки, наявні в матеріалі після його структуроутворення, чинять опір руйнуванню, внаслідок чого тріщини мають розгалужений характер. Слід акцентувати увагу на хвилеподібному характері поширення фронту тріщин при руйнуванні зразка модифікованої матриці з добавкою у кількості $q = 1,00$ мас.ч. Підтверджено, що такий матеріал відзначається високими показниками когезійної міцності, що обумовлює значну енергоємність його деформування і руйнування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Buketov A. V. Nanommodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A. V. Buketov, D. O. Zinchenko, S. O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2017. – Vol. 8. – P. 41–54.
2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport*. – 2016. – Vol. 31 (3). – P. 333–342.
3. Лидин Р. А. Химические свойства неорганических веществ : учеб. пособие для вузов / Р. А. Лидин. – М. : Химия, 2000. – 480 с.
4. Букетов А. В. Епоксидні наноккомпозити: монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В. Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.
5. Букетов А. В. Епоксидні композити, модифіковані високочастотним імпульсним магнітним полем : монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В. О.Скирденко, В. Л. Алексенко, О. І. Скирденко. – Херсон : ХДМА, 2016. – 201 с.
6. Ходаковський О. В. Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту / О. В. Ходаковський, М. Ю. Амелін, С. О. Сметанкін, О. В. Акімов, В. М. Яцюк // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2016. – № 50 (1222). – С.42–46.

REFERENCES

1. Buketov A. V. Nanommodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A. V. Buketov, D. O. Zinchenko, S. O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2017. – Vol. 8. – R. 41–54.
2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport*. – 2016. – Vol. 31 (3). – P. 333–342.
3. Lidin R. A. Khimicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv : ucheb. posobie dlya vuzov / R. A. Lidin. – M. : Khimiya, 2000. – 480 s.

4. Buketov A. V. Epoksidni nanokompoziti: monografiya / A. V. Buketov, O. O. Saprnov, V. L. Aleksenko. – Kherson : KhDMA, 2015. – 184 s.
5. Buketov A. V. Epoksidni kompoziti, modifikovani visokochastotnim impul'snim magnitnim polem : monografiya / A. V. Buketov, O. O. Saprnov, V. O. Skirdenko, V. L. Aleksenko, O. I. Skirdenko. – Kherson : KhDMA, 2016. – 201 s.
6. Khodakovskiy O. V. Doslidzhennya vplivu paraaminoazobenzolu na adgeziyjni vlastivosti epoksidnoi matrici dlya zakhisnikh pokrittiv zasobiv transportu / O. V. Khodakovskiy, M. Yu. Amelin, S. O. Smetankin, O. V. Akimov, V. M. Yacyuk // Visnik NTU «KhPI». – 2016. – № 50 (1222). – S.42–46.

Ходаковский А. В., Амелин М. Ю., Букетова Н. Н., Сапронов А. А., Яцюк В. Н.
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПАРААМИНОАЗОБЕНЗОЛОМ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РЕМОНТА СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

В работе для формирования композитных материалов использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, отвердитель полиэтиленполиамин ПЕПА и модификатор. Исследована зависимость содержания модификатора на физико-механические свойства эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными когезионными свойствами оптимальное содержание модификатора парааминоазобензола составляет $q = 1,0$ масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Такие материалы характеризуются повышенной механической прочностью и способностью сопротивляться статическим, динамическим напряжениям, а также нагрузке ударного характера, поскольку значения показателей свойств составляют: разрушающие напряжения при изгибе – $\sigma_{изг} = 51,8$ МПа, модуль упругости при изгибе – $E = 3,9$ ГПа, ударная вязкость – $W = 11,9$ кДж/м². Полученные результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств композитных материалов хорошо согласуются с результатами испытаний образцов методом оптической микроскопии, что свидетельствует об их достоверности.

Ключевые слова: эпоксидный композит, модуль упругости, ударная вязкость, разрушающие напряжения при изгибе.

Khodakovskii A. V., Amelin M. Yu., Buketova N. M., Saprnov A.A., Yatsyuk V. M.
INVESTIGATION OF PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES MODIFIED WITH PARA-AMINOAZOBENZENE FOR REPAIRING THE MEANS OF TRANSPORT

An epoxy diane oligomer ED-20, a hardener polyethylene polyamine PEPA and a modifier were used in the work for the formation of composite materials. The dependence of the modifier content on the physico-mechanical properties of epoxy composites was studied. It is proved that for the formation of a composite material or protective coating with improved cohesive properties, the optimum content of the para-aminoazobenzene modifier is $q = 1.0$ mass parts by 100 parts by mass epoxy oligomer ED-20. Such materials are characterized by increased mechanical strength and the ability to withstand static, dynamic stresses, as well as impact loads, since the values of the properties are: destructive stresses while bending – $\sigma = 51.8$ MPa, modulus of elasticity while bending – $E = 3.9$ GPa, impact toughness is $W = 11.9$ kJ/m². The obtained results of experimental studies of the physico-mechanical properties of composite materials are in good agreement with the results of testing samples by optical microscopy, which indicates their reliability.

Keywords: epoxy composite, modulus of elasticity, impact strength, breaking stresses in bending

© Ходаковський О. В., Амелін М. Ю., Букетова Н. М., Сапронов О.О., Яцюк В. М.

Статтю прийнято
до редакції 13.05.17

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 620.178.169

ВЛИЯНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ

Буря А. И., к.т.н., проф., профессор кафедры физики конденсированного состояния Днепропетровского государственного технического университета, e-mail: ol.burya@gmail.com;

Липко Е. А., с.н.с. Украинского государственного химико-технологического университета (г. Днепр);

Томина А.-М. В., аспирант кафедры физики конденсированного состояния, Днепропетровского государственного технического университета

В статье рассмотрено влияние органических волокон на трибологические свойства фенолформальдегидной смолы. Установлено, что при введении 60 мас. % органического полисульфонамидного волокна, снижаются коэффициент трения в 2 раза и интенсивность линейного износа на 39 % по сравнению с аналогом, армированным параарамидным волокном Русар-С. Определено, что наилучшим комплексом прочностных характеристик характеризуется композит, содержащий 60 мас. % волокна Русар – С, превосходя композицию, содержащую волокно Танлон в 1,3–2 раза соответственно. В статье показано, что композиционный материал с оптимальным содержанием волокна (60 мас. % Танлона), обладает хорошими триботехническими характеристиками, что позволяет рекомендовать его использование в подвижных соединениях машин и механизмов, а также деталей ответственного назначения.

Введение. Широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) во все отрасли народного хозяйства является существенным элементом научно-технической революции, которая охватывает все промышленно развитые страны. В этом процессе решающую роль играет производство полимеров с улучшенными эксплуатационными свойствами. В результате замены традиционных материалов (баббит, бронза и др.) пластмассами стало возможно улучшать эксплуатационные характеристики узлов трения многих машин и аппаратов.

Особое внимание уделено износостойкости полимерных композиционных материалов, поскольку изготовление колес и подшипников скольжения из ПКМ – одно из наиболее перспективных направлений. ПКМ нового поколения, благодаря хорошему комплексу эксплуатационных характеристик, позволяют увеличить ресурс механизмов, повысить их надежность, снизить затраты при ремонте и эксплуатации [1, 2].

Решение проблемы. Надежность, долговечность и точность работы оборудования в значительной степени зависят от износостойкости отдельных деталей. Учитывая это, весьма актуальной задачей является создание и использование в узлах и механизмах оборудования новых полимерных материалов. Кроме того, их применение снижает себестоимость и трудоемкость изготовления подвижных сочленений и затраты при эксплуатации. Наиболее перспективными являются материалы, в состав которых входят органические волокна. Волокно выступает «скелетом» композита, воспринимающим основную нагрузку и обеспечивающим жесткость конструкции изделия. Упрочнение пластмасс волокнами имеет много преимуществ – низкая масса, высокие удельные характеристики при растяжении, большая прочность, стойкость к разрушению, высокотемпературная прочность, высокая вязкость разрушения, химическая и электромагнитная инертность, легкость и химическая пассивность материалов волокон [3, 4].

Объекты и методы исследования. В качестве связующего использовали фенолформальдегидную смолу ЛБС-1 (ГОСТ 901-78), получаемую путем конденсации фенолов с формальдегидом в водной среде в присутствии аминного катализатора при нагревании с последующим охлаждением продукта конденсации и добавлением в него спиртового растворителя до достижения требуемой вязкости.

Таблица 1 – Технические характеристики ЛБС-1

<i>Показатель</i>	<i>Показатель</i>
Массовая доля, %	
смолы	50–60
воды	10–17
свободного фенола	9–10
Динамическая вязкость, МПа·с	60–1000
Время желатинизации на плитке при 423 К, с.	50–120
Гарантийный срок хранения при температуре не выше 293 К	3 месяца

В качестве наполнителей выступали:

– органическое параарамидное волокно Русар-С (производство Россия), обладает высокими прочностными и технологическими характеристиками, предназначено для изделий специального назначения (табл. 2) [5].

– органическое полисульфонамидное (ПСА) волокно Танлон Т 700 (производство Шанхай), обладающего высокой термостойкостью (табл. 2).

Таблица 2 – Свойства волокон [6, 7]

<i>Показатель</i>	<i>Русар-С</i>	<i>Танлон Т 700</i>
Плотность, г/см ³	1,45	1,42
Модуль упругости при растяжении, ГПа	170	7,45
Относительное удлинение при разрыве, %	3,3	20-25
Прочность при разрыве, сН / дтекс	5,5-6,5*	>3
Температура размягчения, К	700-755	640
Температура эксплуатации, К:		
– длительной;	433-453	523
– кратковременной	573	573
Кислородный индекс	35	33

*при испытании микропластика

Композиции, состоящие из 30–40 мас. % фенолформальдегидной смолы марки ЛБС-1 (ГОСТ 901-78) и хаотически расположенного в ней волокнистого наполнителя: параарамидного Русар-С (60 мас. %) и полисульфонамидного Танлон Т 700 (60–70 мас. %), готовили по следующей технологической схеме:

– приготавливали раствор фенолформальдегидного связующего для пропитки – бакелитовый лак разводили ацетоном до концентрации 30–35 % (в пересчете на сухой олигомер);

– пропитку связующего волокнистым наполнителем проводили механическим смешением (хаотическое армирование);

– феноорганопрепрег сушили 24 часа на воздухе при комнатной температуре и при 353 К в термошкафу до обеспечения содержания летучих в фенопрепреге 6–6,5 %;

– прессование образцов органопластиков (ОП) проводили при удельном давлении 35–40 МПа и температуре 433 К, температура загрузки пресс-материала в пресс-форму и температура выгрузки – 353 К, скорость подъема температуры 2 град/мин [8].

Трибологические характеристики изучали в условиях трения без смазки на дисковой машине трения [9] при нагрузке 0,6 МПа, скорости скольжения 1 м/с. Путь трения составлял 1000 м. Образцы из ОП изготавливались цилиндрической формы $\varnothing=10$, $h=12$ мм; в качестве контртела использовали сталь 45 (45–48 HRC, $R_a=0,16-0,32$ мкм).

Коэффициент трения определяли по формуле:

$$f = \frac{F_1 + F_2}{N},$$

где F_1 – сила трения исследованного образца; F_2 – потери, что возникают при повороте рычага на остриях в горизонтальной плоскости. Точность измерения силы трения составляла 5 %; N – нормальная нагрузка на образец.

Износ образцов определяли весовым методом на аналитических весах ВЛР – 200 (ГОСТ 24104–80) с точностью 0,0001 г. За основную инженерную характеристику процесса изнашивания принимали интенсивность линейного износа I_h , выраженную соотношением:

$$I_h = \frac{\lambda}{\rho_T} \cdot \frac{dG}{A_a \cdot dL_T};$$

$$\lambda = \frac{A_a}{A_T},$$

где G – величина массового износа; ρ_T – плотность изнашиваемого материала; A_a – номинальная площадь контакта; L – путь трения; A_T – номинальная площадь трения.

Принимали $\lambda=1$, то есть рассматривали износ тела, все точки поверхности трения которого постоянно находятся в контакте.

Результаты исследований. Анализируя результаты исследований, представленные на рис. 1, видно, что наибольшим коэффициентом трения обладает ОП, содержащий 60 мас. % волокна Русар, при содержании волокна Танлон 60–70 мас. % данный показатель снижается в 2 раза.

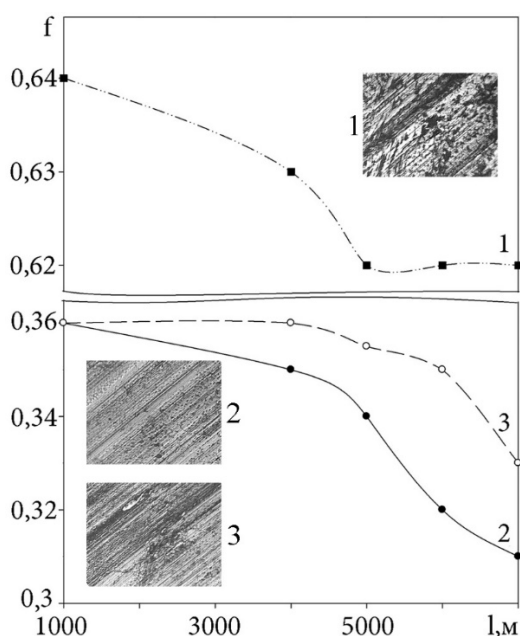


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения от длины пути органопластиков на основе смолы ЛБС-1 содержащих: 60 мас. % волокна Русар (1), 60 (2) и 70 (3) мас. % волокна Танлон

При трении ОП, наполненного Русаром (рис. 1), на его поверхности образуются глубокие борозды – неровности более твердой поверхности (диск) пропахивают более мягкую (полимер), образуя дорожку трения. Поверхность ОП, армированного Танлоном более гладкая в сравнении с трибоповерхностью органопластика, упрочненного Русаром [10]. По мере увеличения длины пути, коэффициент трения снижается, поскольку в процессе трения ОП по стальному диску появляется граничный слой, который значительно снижает адгезию органопластиков к контртелу.

Волокно ПСА замедляет процесс отверждения фенолоформальдегидной смолы, сорбируя низкомолекулярные компоненты на поверхности волокон, что является причиной снижения физико-механических свойств (табл. 3) и коэффициента трения (рис. 1). Высокая износостойкость исследованных материалов обусловлена термической устойчивостью синтетических волокон, природой межфазных слоев и особенностями триботехнических процессов при трении без смазки [11].

Что касается износа, наименьшими значениями обладает ОП, содержащий 60 мас. % Танлона, при повышении содержания последнего до 70 мас. % износ увеличивается. Объясняется это, как и в случае с коэффициентом трения, тем, что разрыхление на границе «полимер – волокно (наполнитель)» начинает превалировать над упорядочением макромолекул связующего. Подтверждением сказанного служит тот факт, что экспериментальная (гидростатическая) плотность ОП, содержащего 70 мас. % волокна, меньше расчетной табл. 3, что обусловлено снижением плотности упаковки макромолекул на границе раздела «полимер–волокно».

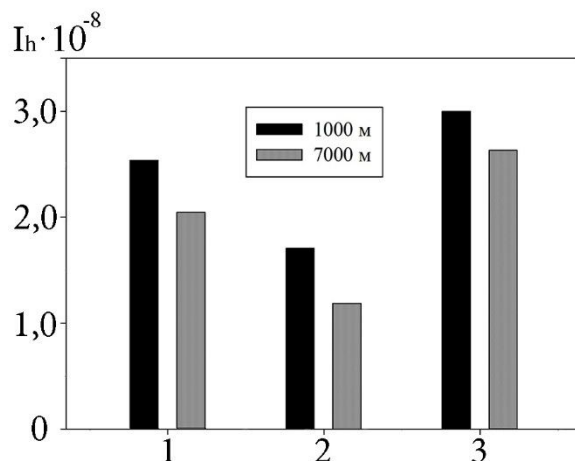


Рисунок 2 – Интенсивность линейного износа органопластиков на основе смолы ЛБС-1 содержащих: 60 мас. % волокна Русар (1), 60 (2) и 70 (3) мас. % волокна Танлон

Таблица 3 – Расчетная и определенная экспериментально гидростатическим методом плотность органопластиков

Композиция	ЛБС-1+60% Русар	ЛБС-1+60% ПСА	ЛБС-1+70% ПСА
Расчетная плотность, г/см ³	1,2634	1,2496	1,2882
Экспериментальная плотность, г/см ³	1,2686	1,3248	1,2855
Модуль упругости E, МПа	2820	2152	1419
Предел текучести σ _т , МПа	104	82	49
Относительная деформация ε, %	4,6	4,9	4,6

Выводы. Результаты проведенных испытаний свидетельствуют о том, что наилучшим комплексом трибологических характеристик обладает ОП, содержащий 60 мас. % волокна Танлон, который превосходит композит с Русаром по коэффициенту трения в 2 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарнопольский Ю. М. Перспективы применения композитов в машиностроении / Ю. М. Тарнопольский // Изв. АН Латв ССР. – 1989. – № 3. – С.63–70.
2. Бюллер К.-У. Тепло- и термостойкие полимеры / К.-У. Бюллер ; пер. с нем. Н. В. Афанасьева, Г. М. Цейтлина; под. ред. Я.С. Выгодского. – М. : Химия, 1984. – 1056 с.
3. Афанасьев Б. А. Проектирование элементов подсистем автомобиля из композиционных материалов / Б. А. Афанасьев, И. З. Даштиев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 136 с.
4. High performance organic fibers for composite reinforcement / Calundann G., Jaffe M., Jones R. S. [et al.] // Fibre Reinforcem. Compos. Mater. – 1988. – P. 211–248.
5. Шебанов С. М. Увеличение прочностных характеристик арамидного волокна Русар при электромагнитной обработке / С. М. Шебанов, И. К. Новиков // Наука и мир. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 81–83.

6. Черкасова Н. Г. Реактопласты, хаотически армированные химическими волокнами / Н. Г. Черкасова, А. И. Буря. – Днепропетровск : ИМА-прес, 2011. – 234 с.
7. Tanlon against fire, Shanhai Tanlon fiber CO, Ltd.
8. Пат. Украины № Полимерная композиция конструкционного назначения / Буря А. И., Черкасова Н.Г., Арламова Н.Т., Тихонов И.В., Сугак В.Н.; заявитель и патентообладатель ООО НПП «Термотекс». – № 2005113831/04; заявл. 10.11.06; опубл. 27.11.09, Бюл. №33.
10. Буря А. И. Трение и изнашивание органопластиков на основе полиамида-6 / А. И. Буря // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 5 – С. 671–676.
11. Буря А. И. Влияние содержания волокна оксалон на триботехнические характеристики органопластиков на основе фенолона С-1 / А. И. Буря, А.-М. В. Томина, В. А. Чернов // Проблеми трибології. – 2016. – № 4. – С. 11–16.
12. Термофрикционные свойства армированных систем на основе тканей из полигетероариленов. Коршак В. В., Грибова И. А., Краснов А. П. [и др.] // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 6. – С. 965–971.

REFERENCES

1. Tarnopolskyi, Yu. M. (1989). Perspektivi pryumenenya kompozytov v mashynostroenu / *Yzv. AN Latv SSR*, 3. 63–70.
2. . Biuller, K.-U. (1984). *Teplo- y termostoikye polimeri*. Moskva: Khymiya.
3. Afanasev, B. A. S Dashtyev, Y. Z. (2007). *Proektyrovanye elementov podsystem avtomobylia yz kompozytsyonnikh materyalov*. MHTU ym. N.E. Baumana.
4. Calundann, G., Jaffe, M., Jones, R.S., & Yoon, H. (1988). *High performance organic fibers for composite reinforcement*. Fibre Reinforcem. Compos. Mater. 211–248
5. Shebanov, S. M., & Novykov, Y. K. (2014). Uvelychenye prochnostnykh kharakterystyk aramydnogo volokna Rusar pry elektromahnytnoi obrabotke. *Nauka y myr.*, 1, 81–83.
6. Cherkasova, N. H., Buria, A. Y. (2011). *Reaktoplasti, khaotychesky armovannie khymycheskymy voloknamy*. Dnepropetrovsk: YMA.
7. Tanlon against fire, Shanhai Tanlon fiber CO, Ltd.
8. Buria, A. Y., Cherkasova, N. H., Arlamova, N. T., Tykhonov, Y. V., Suhak, V. N. Polymernaia kompozytsiya konstruktsyonnoho naznacheniya /; zaiavytel y patentoobladatel ООО НПП «Термотекс». – № 2005113831/04; zaiavl. 10.11.06; opubl. 27.11.09, Biul. № 33.
9. Buria, A. Y. (1998). Trenye y yznashyvanye orhanoplastykov na osnove polyamida-6. *Trenye y yznos*, 19, 5, 671–676.
10. Buria, A. Y., Tomyna, A.-M. V., & Chernov, V. A. (2016). Vlyanye sodержaniya volokna oksalon na trybotekhnicheskye kharakterystyky orhanoplastykov na osnove fenylona S-1. *Problemy trybolohii*, 4, 11–16.
11. Korshak, V. V., Hrybova, Y. A., & Krasnov, A. P. et al. (1984). Termofryktsyonnie svoistva armyrovannikh system na osnove tkanei yz polyheteroarylenov. *Trenye y yznos*, 5, 965–971.

Буря А. І., Липко Є. А., Томина А.-М. В. ВПЛИВ СИНТЕТИЧНИХ ВОЛОКОН НА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГІДНОЇ СМОЛИ

У статті розглянуто вплив органічних волокон на трибологічні властивості фенолформальдегідної смоли. Встановлено, що при введенні 60 мас. % органічного полісульфонамідного волокна, знижується коефіцієнт тертя в 2 рази й інтенсивність лінійного зношування на 39 % порівняно з аналогом, армованим параарамідним волокном Русар-С. Визначено, що найкращим комплексом міцнісних характеристик володіє композит, що містить 60 мас. % волокна Русар-С перевершуючи композицію що містить волокно Танлон в 1,3–2 рази відповідно. У статті показано, що композиційний матеріал з оптимальним вмістом волокна (60 мас. % Танлона), володіє хорошими триботехнічними характеристиками, що дозволяє рекомендувати його для використання в рухливих з'єднаннях машин і механізмів, а також деталей відповідального призначення.

Burya A. I., Lipko E. A., Tomina A.-M. V. THE INFLUENCE OF SYNTHETIC FIBERS ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF PHENOLFORMALDEHYDE RESIN

The influence of organic fibers on the tribological properties of phenol-formaldehyde resin was regarded in this article. It was found that, with 60 wt. % of organic polysulfonamide fiber, the coefficient of friction is reduced by 2 times and the intensity of linear wear is reduced by 39 % compared to the analogue reinforced with paraaramide fiber Rusar-C. It is determined that the best complex of strength characteristics is characterized by a composite containing 60 wt. % Fiber Rusar-With superior composition containing fiber Tanlon in 1,3–2 times, respectively. The article shows that the composite material with the optimal fiber content (60 % by weight of Tanlon) has good tribotechnical characteristics, which allows recommending its use in mobile connections of machines and mechanisms, as well as for critical parts.

© Буря А. І., Липко Є. А., Томіна А.-М. В.

Статтю прийнято
до редакції 22.05.17

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИО

Врублевский Р. Е., к.т.н., доцент кафедры общинженерной подготовки Херсонской государственной морской академии, e-mail: amor-vr@narod.ru

В статье рассмотрены вопросы экономической эффективности интеллектуальной системы управления МИО основанной на генетических алгоритмах и нечетких нейронных сетях. Произведенные экономические расчеты показателей затрат на процесс МИО с применением системы управления показали снижение трудоемкости процесса на 20–30 %, энергетических затрат на 15–25 % и времени на обработку 10–25 %.

Ключевые слова: интеллектуальная система, экономическая эффективность, магнитно-импульсная обработка.

Вступление. Применяемые в настоящее время в машиностроении и судостроении традиционные методы создания систем управления МИО (магнитно-импульсной обработкой) исчерпали свои инженерные возможности, а прогрессивные информационные технологии, основанные на использовании компьютерных комплексов, находятся в стадии разработки и апробирования. Существует множество подходов к оценке эффективности принимаемых решений при создании сложных технических систем. Большинство авторов подчеркивают субъективность в выборе критериев оценки полученных результатов и допускают определенный уровень риска и достоверности принятых решений [1–4].

Цель статьи. Провести исследования экономической эффективности интеллектуальной системы управления МИО, основанной на генетических алгоритмах и нечетких нейронных сетях.

Основная часть. Существует множество подходов к оценке эффективности принимаемых решений при создании сложных технических систем.

В нашем случае эффективность принятых решений оценивается: 1) величиной риска, допустимого при выборе режимов МИО, т.е. величиной вероятности ошибочного решения, вычисляемого по результатам контрольных выборок, а также 2) сравнительной оценкой вариантов принятия решений по экономическим показателям затрат на процесс МИО.

Экспериментальные исследования эффективности системы управления МИО, произведенные на примерах производственных задач повышения стойкости и долговечности режущего инструмента, показали, что вероятность получения ошибочных решений лежит в пределах 3–5 %. Сравнение этого результата с результатами обработок без системы управления МИО при величине контрольной выборки обработанных 200 штук деталей, свидетельствуют о повышении качества и эффективности процесса МИО в 2–4 раза.

При выборе вариантов режимов МИО очевидно, что те режимы будут предпочтительными, которые в наилучшей мере обеспечивают улучшение показателей обрабатываемого инструмента при оптимальных затратах для достижения в денежном (стоимостном) и временном аспектах (времени на обработку). При разработке системы управления режимами МИО главное внимание было уделено выбору оптимальных режимов МИО, снижению энергетических затрат на процесс МИО.

Произведем экономический расчет показателей затрат на процесс МИО:

Критерий эффективности МИО – это свойство системы управления, характеризующее ее способность выполнять задачи по повышению стойкости обрабатываемого инструмента. Эффективность будем измерять в условных единицах от 0 до 100, где 100 – максимальная эффективность МИО, полученная вследствие эксперимента.

$$K_{\text{эф}} = 1/(t_0 Z_{\text{эл}}, T_{\text{пизд}}), \quad (1)$$

где t_o – время затраченное на обработку, мин; $Z_{эл}$ – затраты на электроэнергию, грн; $Tp_{изд}$ – трудоемкость обработки детали.

Определение времени, затраченного на обработку:

$$t_o = t_{oc} t_{en} t_{обс}, \quad (2)$$

где t_{oc} – основное технологическое время, мин (это время, в течении которого происходит процесс МИО); t_{en} – вспомогательное время, мин (включает затраты на установку и снятие обрабатываемой детали, контрольные измерения); $t_{обс}$ – время технического обслуживания рабочего места, мин (затрачивается рабочим на уход за рабочим местом в процессе данной работы. Сюда входит время на подналадку и регулировку установки МИО в процессе работы).

Определение затрат на электроэнергию:

$$Z_{эл} = C(P_{уст} \cdot t_{oc} \cdot K_p) / (60 \cdot K_{nc} \cdot K_z), \quad (3)$$

где C – стоимость 1 киловатт час силовой энергии, грн; $P_{уст}$ – установленная мощность электрического двигателя установки (из технической характеристики станка); K_p – коэффициент загрузки двигателя станка по мощности; t_{oc} – основное технологическое время, мин; K_{nc} – коэффициент учитывающий потери в сети (0,96); K_z – КПД генератора (0,90–0,95).

Определение трудоемкости обработки детали:

$$Tp_{изд} = \sum_{i=1}^n t_{ум_i} m_i, \quad (4)$$

где n – число деталей в партии; $t_{ум_i}$ – штучное время выполнения обработки i -ой детали; m_i – число операций МИО изготовления i -ой детали;

$$t_{ум_i} = t_o \cdot t_{oo} \cdot t_{омд}, \quad (4)$$

где t_{oo} – время организационного обслуживания, затрачиваемое на подготовку установки МИО к работе в начале смены и на уборку ее в конце смены, а также на передачу установки сменщику; $t_{омд}$ – время на отдых и естественные надобности.

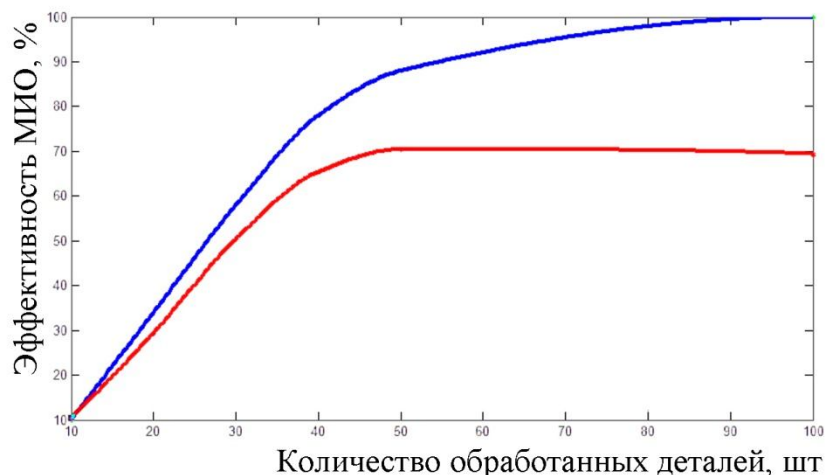


Рисунок 1 – Результат расчета эффективности МИО с применением ИСУ МИО и без нее

Критерий качества обработки – это количество обработанных деталей с удовлетворяющей заявленной стойкостью в процентном соотношении. Стойкость инструмента – это суммарное время его работы между переточками на определенном режиме резания.

Подставив в формулы численные данные, полученные вследствие эксперимента МИО 100 сверл диаметром 4 мм, с применением разработанной системы управления и без нее. Полученные результаты отобразим в графиках рис. 1, 2.

Эффективность будем измерять в условных единицах от 0 до 100, где 100 – максимальная эффективность МИО, полученная вследствие эксперимента.

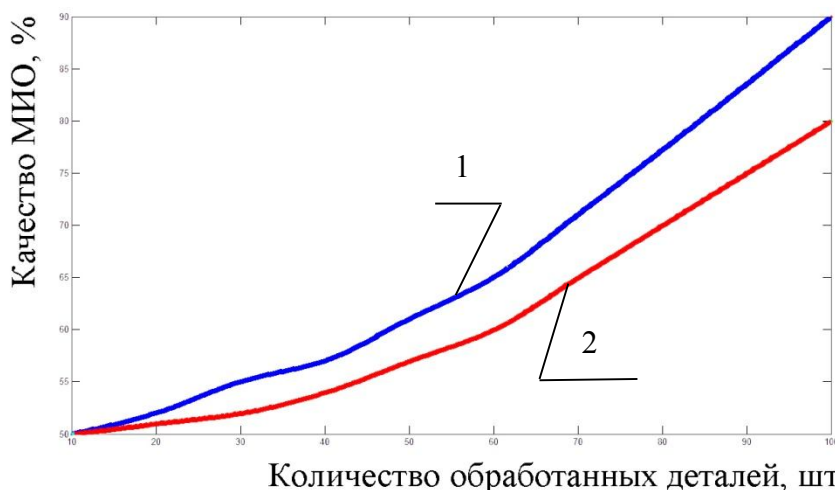


Рисунок 2 – Результат расчета качества МИО с применением ИСУ МИО (1) и без нее (2)

Выводы. Произведенные экономические расчеты показателей затрат на процесс МИО с применением системы управления показали снижение трудоемкости процесса на 20-30%, энергетических затрат на 15–25 % и времени на обработку 10–25 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершов А. А. Способ и оценка эффективности интеллектуализации разработки асу для сложных производственно-технических систем / А. А. Ершов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1.
2. Методы оценки качества и эффективности систем эксплуатации сложных технических объектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://texproc.ru/index.php/biblioteka/91-o-intellektualnykh-sistemakh-upravleniya/ekspsis/166-mok?limitstart=0>
3. Нгуен Куанг Тхыонг. Методы и модели надежности, эффективности и безопасности сложных технических систем в конфликтных ситуациях / Нгуен Куанг Тхыонг. – М., 1999. – 322 с.
4. Конесев С. Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем / С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1.

REFERENCES

1. Ershov A. A. Spособ i ocenka ehffektivnosti intellektualizacii razrabotki asu dlya slozhnihkh proizvodstvenno-tekhnicheskikh sistem / A. A. Ershov // Sovremennihe problemih nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 1.
2. Metodih ocenki kachestva i ehffektivnosti sistem ehkspluatacii slozhnihkh tekhnicheskikh objhektov [Ehlektronnihyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://texproc.ru/index.php/biblioteka/91-o-intellektualnykh-sistemakh-upravleniya/ekspsis/166-mok?limitstart=0>
3. Nguen Kuang Tkhihong. Metodih i modeli nadezhnosti, ehffektivnosti i bezopasnosti slozhnihkh tekhnicheskikh sistem v konfliktnihkh situaciyakh / Nguen Kuang Tkhihong. – М., 1999. – 322 s.

4. Konesev S. G. Metodih ocenki pokazateleyj nadezhnosti slozhnihkh komponentov i sistem / S. G. Konesev, R. T. Khazieva // Sovremenniye problemih nauki i obrazovaniya. – 2015. – № 1.

Врублевський Р. Є. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МІО

У статті розглянуті питання економічної ефективності інтелектуальної системи управління МІО заснованої на генетичних алгоритмах і нечітких нейронних мережах. Зроблені економічні розрахунки показників витрат на процес МІО із застосуванням системи управління показали зниження трудомісткості процесу на 20-30%, енергетичних витрат на 15-25% і часу на обробку 10-25%.

Ключові слова: інтелектуальна система, економічна ефективність, іагнітно-імпульсна обробка.

Vrublevsky R. E. EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE MIS CONTROL SYSTEM

The questions of economic efficiency of intellectual control system of MIO based on genetic algorithms and fuzzy neural networks are considered in the article. The economic calculations of the cost parameters for the MIO process using the management system showed a 20-30% reduction in the labor intensity of the process, 15-25% in energy costs and 10-25% in processing time.

Keywords: intellectual system, economic efficiency, pulse-and-impulse processing.

© Врублевський Р. Є.

Статтю прийнято
до редакції 10.05.17

СТРУКТУРНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБИРАННЯ ДАНИХ І МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Волков В. П., д.т.н., проф., завідувач кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Грицук І. В., д.т.н., професор кафедри експлуатації судових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, e-mail: gritsuk_iv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7065-6820;

Грицук Ю. В., к.т.н., доц., в.о. завідувача кафедри загальної інженерної підготовки Донбаської національної академії будівництва і архітектури (м. Краматорськ), ORCID: 0000-0003-3389-1172;

Волков Ю. В., аспірант кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

В роботі представлено обґрунтування структурного підходу до розробки автоматизованої системи збирання даних і моніторингу параметрів технічного стану транспортного засобу під час експлуатації в умовах ITS. Обґрунтовано і запропоновано підхід до формування математичних моделей оцінювання поточного і прогнозування параметрів технічного стану автомобіля в умовах ITS при роботі в межах віртуального підприємства з експлуатації автомобільного транспорту. Визначено основні інформаційні елементи об'єктів автоматизації транспортного засобу. Здійснено аналіз інформаційної моделі предметної області транспортного засобу. Запропоновано інформаційні взаємодії залежностей для реалізації.

Ключові слова: збір даних, моніторинг, параметр, транспортний засіб, математична модель.

Вступ Для ефективної роботи транспортних засобів (ТЗ) в умовах оточуючого середовища необхідно постійно здійснювати їх конструктивну модернізацію та використовувати нові технологічні й інформаційні методи та підходи вибору стратегії технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) ТЗ. Конструктивна модернізація ТЗ, полягає у широкомасштабному використанні електронних (комп'ютерних, інформаційних) систем, які контролюють різноманітні процеси, що відбуваються під час виконання поставлених завдань перед ТЗ, забезпечують інформатизацію означених процесів, оптимізують та планують їх роботу, а також створюють умови для проведення моніторингу параметрів технічного стану. При цьому важливим завданням є оптимізація та обґрунтування комплексу технічних дій для поліпшення ТО і(або) Р й забезпечення високого коефіцієнту технічної готовності ТЗ в умовах експлуатації, що змінюються у часі [1].

Використання ТЗ в нестаціонарних умовах експлуатації вимагає постійного контролю фактичного його стану, проведення необхідних технічних дій з обслуговування для забезпечення належного працездатного стану. Подібна інтерпретація умов використання ТЗ можлива лише за умов моніторингу технічного стану, які ґрунтуються на обробці апріорної інформації, безперервній діагностиці та прогнозуванні параметрів їх технічного стану. Перед науковцями, що займаються питаннями експлуатації ТЗ, постають проблеми забезпечення повноцінного зв'язку між процесами експлуатації ТЗ і параметрами умов експлуатації [2, 3], узагальнення та удосконалення методів прогнозування технічного стану ТЗ [1], урахування та контролю параметрів технічного стану ТЗ в умовах експлуатації, а саме: формування підходу до розробки автоматизованої системи збирання даних і моніторингу параметрів технічного стану ТЗ.

Постановка задачі. Метою статі є вирішення актуального питання формування структурного підходу до розробки автоматизованої системи збирання даних і моніторингу параметрів технічного стану транспортного засобу.

Основні результати. Для формування структурного підходу і визначення предметної області інформаційної системи оцінювання параметрів технічного стану в

умовах експлуатації ТЗ при проведенні моніторингу була використана діаграма потоків даних (DFD – Data Flow Diagramm) [4, 5–9, 14] у нотації «Йордона–Де Марко» [11]. До функціональних завдань розробленої інформаційної системи моніторингу ТЗ відносимо ідентифікацію, моніторинг параметрів, діагностування технічного стану ТЗ та оцінка умов експлуатації ТЗ засобами ITS [8–14].

У межах DFD-діаграми [12, 14] авторами запропоновано структуру моделі інформаційного забезпечення системи моніторингу технічного стану ТЗ в умовах експлуатації у вигляді інформаційної моделі ПК «IdenMonDiaOperCon (Identification, Monitoring technical condition, Diagnosis, Operating conditions of the vehicle under ITS) «HNADU-16»». Основними етапами обробки інформації про технічний стан ТЗ в ПК є ідентифікація ТЗ в просторі, системі моніторингу й нестационарних умовах експлуатації; збирання вихідних даних про параметри технічного стану ТЗ в умовах експлуатації; прогнозування параметрів стану ТЗ; ідентифікація умов експлуатації; діагностування стану, збирання повідомлень і даних діагностування ТЗ; перевірка відповідності дійсного стану ТЗ отриманим параметрам і умовам експлуатації в процесі моніторингу.

Інформаційна система моніторингу (ICM) стану і умов експлуатації ТЗ включає в себе сукупність стаціонарних і мобільних (бортових щодо ТЗ) систем збору і передачі інформації. Система збору є телекомунікаційною мережею обміну даними, яка може використовувати всі способи передачі даних. Стаціонарні пости виконують комунікаційні функції і найпростіші функції контролю. Ці функції забезпечують отримання контрольнo-вимірювальної і технологічної інформації від бортових систем, контроль часу руху ТЗ в заданих пунктах, збір інформації про комунікації і споруди, передачу даних в інформаційний програмний комплекс (ПК) [15].

Для формування бази даних про технічний стан і умови експлуатації ТЗ на основі можливостей ITS отримана інформація системно перерозподіляється між основними інформаційними блоками у складі об'єктів автоматизації транспортного засобу (табл. 1), а саме між наступними блоками збирання і передачі інформації ТЗ: від двигуна, про витрату палива, про забезпечення екологічної безпеки, про результати діагностування технічного стану, від транспортного засобу, про умови експлуатації і про ідентифікацію.

Таблиця 1 – Об'єкти автоматизації транспортного засобу

<i>№</i>	<i>Позначення</i>	<i>Найменування</i>
1	<i>o₁</i>	Блок збирання і передачі інформації від двигуна ТЗ
2	<i>o₂</i>	Блок збирання і передачі інформації про витрату палива ТЗ
3	<i>o₃</i>	Блок збирання і передачі інформації про забезпечення екологічної безпеки ТЗ
4	<i>o₄</i>	Блок збирання і передачі інформації про результати діагностування технічного стану ТЗ
5	<i>o₅</i>	Блок збирання і передачі інформації від транспортного засобу
6	<i>o₆</i>	Блок збирання і передачі інформації про умови експлуатації ТЗ
7	<i>o₇</i>	Блок збирання і передачі інформації про ідентифікацію ТЗ

При цьому, за допомогою сканера-адаптера Scanmaster ELM327 для зчитування інформації про параметри технічного стану через рознімання OBD-II зі штатних датчиків двигуна і ТЗ (БЧ ITS ТЗ) [5, 6], отримана інформація через підключення до спряженого пристрою за допомогою мережі зв'язку передається до серверної частини ITS, автоматизованого робочого місця мережі моніторингу ТЗ та інших учасників процесу моніторингу ТЗ.

Інформаційний обмін між елементами ITS ТЗ, транспортної інфраструктури й інфраструктури автомобільних доріг, у процесах моніторингу параметрів технічного стану в умовах експлуатації здійснювався в ручному, автоматизованому й автоматичному режимах. Результатом процесів моніторингу робочих процесів ТЗ в умовах експлуатації було визначення фактичних параметрів технічного стану самого ТЗ, корегування умов

експлуатації, а також точного визначення місця розташування і точного часу за параметрами, прийнятими від навігаційних супутникових систем, що виконується GPRS приймачем, обміну цією інформацією з робочим місцем моніторингу ТЗ та іншими учасниками моніторингу робочих процесів ТЗ.

Модель предметної області системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ представлена у вигляді наступної множини компонентів і складових системи інформації в частині технічних параметрів стану двигуна ТЗ, технічних параметрів стану безпосередньо ТЗ і параметрів умов експлуатації (УЕ) ТЗ [6–9]:

$$M_{np.o.} = \langle F, H, P, O, V_{ex}, V_{вих}, R \rangle, \quad (1)$$

де $F = \{f_i | i = \overline{1, I}\}$ – множина функцій користування (функції автоматизації), що виконуються системою моніторингу параметрів технічного стану ТЗ; $H = \{h_j | j = \overline{1, J}\}$ – множина завдань обробки даних системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ; $P = \{p_k | k = \overline{1, K}\}$ – множина користувачів (кількість і склад персоналу), яка забезпечує роботу з системою моніторингу параметрів технічного стану ТЗ; $V_{ex} = \{v_l | l \in L_{ex}\}$ – множина вхідних інформаційних елементів; $V_{вих} = \{v_l | l \in L_{вих}\}$ – множина вихідних інформаційних елементів; $V = V_{ex} \cup V_{вих}$ – повна множина інформаційних елементів; $O = \{o_m | m = \overline{1, M}\}$ – множина об'єктів автоматизації ТЗ, які можливо представити самостійними частинами для блоків збирання і передачі інформації: від двигуна ТЗ; від ТЗ про його параметри; від ТЗ про умови експлуатації ТЗ; від ТЗ про результати виконання ідентифікації; від ТЗ про результати проведення діагностики; від ТЗ про параметри екологічної безпеки; від ТЗ про витрату палива; $R = \{r_y | y = \overline{1, Y}\}$ – множина відносин (взаємозв'язків) між компонентами $M_{np.o.}$ предметної області (1) системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ.

При необхідності мати сумісні бази даних і об'єднувати інформаційні системи в залежності від вимог конкретного варіанту завдання на створення предметної області, всі функції в частині користування, завдання обробки даних, об'єктів і автоматизації та інформаційні елементи можуть бути як зменшені, так і збільшені за обсягом.

Розподіляємо на основні інформаційні об'єкти (множини компонентів) предметну область системи для формування інформаційної моделі в частині *об'єктів автоматизації* ТЗ (табл. 1).

Представляємо визначену множину об'єктів автоматизації для ТЗ $O = \{o_m | m = \overline{1, M}\}$ у наступному вигляді:

$$O = \{o_m | m = 1, 7\} \quad (2)$$

$$P(O) = 7 \quad (3)$$

де $P(O)$ – кількість елементів (потужність) множини O об'єктів автоматизації (предикати, що відображають наявність зв'язків між елементами).

Відповідно до поставленого завдання, а саме: формування предметної області системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ, в залежності від технічної спроможності і математичного забезпечення модель повинна описувати для відповідного об'єкту автоматизації всі необхідні інформаційні елементи (вхідні і вихідні дані), а найповніша множина інформаційних елементів $V = \{v_l | l = \overline{1, L}\}$ має вигляд (табл. 2):

$$V = \{v_l | l = 1, 60\} \quad (4)$$

$$P(V) = 60 \quad (5)$$

де $P(V)$ – кількість елементів множини V інформаційної системи; $|$ – обмеження функції на множині інформаційної системи, тобто звуження області визначення функції.

Таблиця 2 – Основні інформаційні елементи об'єктів автоматизації ТЗ

№п	Позначення	Найменування
1	2	3
1	v_1	Тиск моторної оливи (наявність нормального тиску моторної оливи)
2	v_2	Температура охолоджуючої рідини двигуна
3	v_3	Частота обертання двигуна
4	v_4	Положення колінчастого валу
5	v_5	Положення розподільного валу
6	v_6	Температура у впускному колекторі
7	v_7	Тиск повітря у впускному колекторі
8	v_8	Масова витрата повітря
9	v_9	Тиск палива в паливній магістралі
10	v_{10}	Тиск парів в системі подачі палива
11	v_{11}	Кут випередження запалювання
12	v_{12}	Абсолютне положення дроселя
13	v_{13}	Відносне положення дроселя
14	v_{14}	Абсолютне значення навантаження на двигун
15	v_{15}	Основне паливо – повітряне співвідношення для керування двигуном (од.)
16	v_{16}	Основне співвідношення повітря – паливо, л/ л
17	v_{17}	Напруга бортової мережі (акумуляторної батареї) ТЗ
18	v_{18}	Напруга в системі керування двигуном
19	v_{19}	Рівень палива в баку ТЗ
20	v_{20}	Миттєва витрата палива, літр/км (км/літр)
21	v_{21}	Середня витрата палива, літр/км (км/літр)
22	v_{22}	Витрата палива на 100 км. пробігу
23	v_{23}	Середня витрата палива на 100 км. пробігу
24	v_{24}	Передбачувана витрата палива на відповідний пробіг
25	v_{25}	Положення (органа керування паливоподачею) педалі акселератора
26	v_{26}	Температура каталізатора
27	v_{27}	Викиди CO ₂ , г / км
28	v_{28}	Викиди CO ₂ , середні, г / км
29	v_{29}	Напруга на датчику O ₂ каталізатора (лямбда-датчик у банці 1)
30	v_{30}	Напруга на датчику O ₂ каталізатора (лямбда-датчик у банці 2)
31	v_{31}	Пробіг (відстань) від моменту появи похибки, км
32	v_{32}	Час пробігу ТЗ від моменту появи похибки, сек
33	v_{33}	Виявлення несправності
34	v_{34}	Розпізнавання несправності
35	v_{35}	Попередження про наявність несправності
36	v_{36}	Передача інформації про визначену несправність
37	v_{37}	Крутний момент транспортного двигуна (в русі ТЗ)
38	v_{38}	Потужність двигуна ТЗ на пересування (в русі ТЗ)
39	v_{39}	Прискорення ТЗ (загальне)
40	v_{40}	Прискорення ТЗ (вісь X)
41	v_{41}	Прискорення ТЗ (вісь Y)
42	v_{42}	Прискорення ТЗ (вісь Z)
43	v_{43}	Швидкість ТЗ (GPS)

Продовження табл. 2

1	2	3
44	v_{44}	Швидкість ТЗ (OBD)
45	v_{45}	Порівняння (різниця) значень швидкостей GPS і OBD
46	v_{46}	Пробіг (відстань) ТЗ загальний, км
47	v_{47}	Пробіг (відстань) від початку вимірювань, км
48	v_{48}	Пробіг (відстань) добовий, км
49	v_{49}	Час пробігу ТЗ, сек
50	v_{50}	Час пробігу ТЗ загальний, сек
51	v_{51}	Час пробігу ТЗ в русі, загальний, сек
52	v_{52}	Час відстою ТЗ загальний, сек
53	v_{53}	Час пробігу ТЗ після запуску двигуна, сек
54	v_{54}	Номер сесії (вимірювання на відповідному кроці сесії)
55	v_{55}	Середня температура оточуючого середовища
56	v_{56}	Середній тиск оточуючого середовища
57	v_{57}	Координата ТЗ – довгота (GPS)
58	v_{58}	Координата ТЗ – широта (GPS)
59	v_{59}	VIN-код
60	v_{60}	Час збирання інформації

Функції автоматизації інформаційної системи моніторингу параметрів ТЗ, що повинні моделюватися системою моніторингу $F = \{f_i | i = \overline{1, I}\}$, визначаємо у вигляді (табл. 3):

$$F = \{f_i | i = \overline{1, 22}\} \quad (6)$$

$$P(F) = 22 \quad (7)$$

де – $P(F)$ кількість елементів множини F функцій автоматизації.

Таблиця 3 – Функції автоматизації, що виконуються системою моніторингу параметрів технічного стану ТЗ

№ n/n	Позначення	Найменування
1	2	3
1	f_1	Періодичне збирання даних параметрів двигуна ТЗ за інтервал часу Δt
2	f_2	Періодичне збирання даних параметрів витрати палива ТЗ за інтервал часу Δt
3	f_3	Періодичне збирання даних параметрів щодо забезпечення екологічної безпеки ТЗ за інтервал часу Δt
4	f_4	Періодичне збирання параметрів щодо результатів діагностування технічного стану ТЗ за інтервал часу Δt
5	f_5	Періодичне збирання даних параметрів транспортного засобу за інтервал часу Δt
6	f_6	Періодичне збирання даних параметрів щодо умов експлуатації ТЗ за інтервал часу Δt
7	f_7	Періодичне збирання даних щодо інформації про ідентифікацію ТЗ за інтервал часу Δt
8	f_8	Прогнозування значень параметрів двигуна ТЗ
9	f_9	Прогнозування значень параметрів витрати палива ТЗ
10	f_{10}	Прогнозування значень параметрів забезпечення екологічної безпеки ТЗ
11	f_{11}	Прогнозування значень параметрів щодо результатів діагностування технічного стану ТЗ
12	f_{12}	Прогнозування значень параметрів ТЗ
13	f_{13}	Прогнозування значень параметрів щодо умов експлуатації ТЗ

Продовження табл. 3

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
14	f_{14}	Прогнозування значень параметрів щодо інформації про ідентифікацію ТЗ
15	f_{15}	Формування звітів за параметрами двигуна ТЗ
16	f_{16}	Формування звітів за параметрами витрати палива ТЗ
17	f_{17}	Формування звітів за параметрами забезпечення екологічної безпеки ТЗ
18	f_{18}	Формування звітів за параметрами щодо результатів діагностування технічного стану ТЗ
19	f_{19}	Формування звітів за параметрами ТЗ
20	f_{20}	Формування звітів за параметрами умов експлуатації ТЗ
21	f_{21}	Формування звітів за параметрами щодо інформації про ідентифікацію ТЗ
22	f_{22}	Забезпечення актуальності даних для прогнозування параметрів

Основні завдання обробки даних (задачі, процедури) системи моніторингу параметрів ТЗ $H = \{h_j | j = \overline{1, J}\}$ мають вигляд (представлені в табл. 4):

$$H = \{h_j | j = \overline{1, 21}\} \quad (8)$$

$$P(H) = 21 \quad (9)$$

де – $P(H)$ кількість елементів множини H завдань обробки даних системи моніторингу параметрів ТЗ.

Таблиця 4 – Основні завдання обробки даних системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ

<i>№ n/n</i>	<i>Позначення</i>	<i>Найменування</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1	h_1	Періодичне додавання в БД значень параметрів двигуна ТЗ
2	h_2	Періодичне додавання в БД значень параметрів витрати палива ТЗ
3	h_3	Періодичне додавання в БД значень параметрів забезпечення екологічної безпеки ТЗ
4	h_4	Періодичне додавання в БД значень параметрів щодо результатів діагностування технічного стану ТЗ
5	h_5	Періодичне додавання в БД значень параметрів ТЗ
6	h_6	Періодичне додавання в БД значень параметрів щодо умов експлуатації ТЗ
7	h_7	Періодичне додавання в БД значень параметрів щодо інформації про ідентифікацію ТЗ
8	h_8	Видалення даних параметрів двигуна ТЗ із бази даних (БД) у випадку втрати їх актуальності
9	h_9	Видалення даних параметрів витрати палива ТЗ із БД у випадку втрати їх актуальності
10	h_{10}	Видалення даних параметрів щодо забезпечення екологічної безпеки ТЗ із БД у випадку втрати їх актуальності
11	h_{11}	Видалення даних параметрів щодо результатів діагностування технічного стану ТЗ у випадку втрати їх актуальності
12	h_{12}	Видалення даних параметрів транспортного засобу із БД у випадку втрати їх актуальності
13	h_{13}	Видалення даних параметрів щодо умов експлуатації ТЗ із БД у випадку втрати їх актуальності
14	h_{14}	Видалення даних параметрів щодо інформації про ідентифікацію ТЗ із БД у випадку втрати їх актуальності

Продовження табл. 4

1	2	3
15	h_{15}	Вибирання даних з БД за параметрами двигуна ТЗ для їх аналізу та прогнозування
16	h_{16}	Вибирання даних з БД за параметрами витрати палива ТЗ для їх аналізу та прогнозування
17	h_{17}	Вибирання даних з БД за параметрами щодо забезпечення екологічної безпеки ТЗ для їх аналізу та прогнозування
18	h_{18}	Вибирання даних з БД за параметрами щодо результатів діагностування технічного стану ТЗ для їх аналізу та прогнозування
19	h_{19}	Вибирання даних з БД за параметрами транспортного засобу для їх аналізу та прогнозування
20	h_{20}	Вибирання даних з БД за параметрами щодо умов експлуатації ТЗ для їх аналізу та прогнозування
21	h_{21}	Вибирання даних з БД за параметрами щодо інформації про ідентифікацію ТЗ для їх аналізу та прогнозування

В табл. 5 зводимо основні можливі варіанти множини користувачів системи для формування множини значень, що характеризує кількість і склад персоналу, який забезпечує роботу з системою моніторингу параметрів технічного стану ТЗ $P = \{p_k | k = \overline{1, K}\}$, що мають вигляд:

$$P = \{p_k | k = 1, 3\} \tag{10}$$

$$P(P_i) = 3 \tag{11}$$

де $P(P)$ – кількість елементів множини P значень, що характеризують кількість і склад персоналу.

Для формалізованої побудови (опису) й аналізу [10–11] інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ аналітичний опис її семантики виконуємо за допомогою булевих матриць суміжності, що описують відповідні відносини R між компонентами $M_{np.o.}$ (1) предметної області ТЗ [2, 8, 9, 12–14].

Таблиця 5 – Склад експлуатаційного персоналу, який забезпечує роботу системи моніторингу параметрів ТЗ

№ п/п	Позначення	Найменування
1	p_1	Технічний оператор робочого місця мережі моніторингу ТЗ: інженер, механік, менеджер
2	p_2	Черговий оператор: реагування на аварійні сигнали
3	p_3	Представник фірми (заводу) виробника

Для предметної області ТЗ виділяємо наступні види відносин між множинами $\{F, H, P, O, V_{ex.}, V_{вих.}, R\}$ в межах основної предметній області системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ і зводимо їх у табл. 6–8:

$$FH = \|fh_{ij}\| \tag{12}$$

$$FP = \|fp_{ik}\| \tag{13}$$

$$FO = \|fo_{im}\| \tag{14}$$

$$FV = \|fv_{il}\| \quad (15)$$

$$HP = \|hp_{jk}\| \quad (16)$$

$$HO = \|ho_{jm}\| \quad (17)$$

$$HV = \|hv_{jl}\| \quad (18)$$

$$OV = \|ov_{ml}\| \quad (19)$$

Відносини між об'єктами автоматизації (табл. 1) та інформаційними елементами (табл. 2) системи моніторингу показані в табл. 4. Відносини між складом експлуатаційного персоналу (табл. 5), функціями автоматизації (табл. 3) і завданнями обробки даних системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ (табл. 4) показані в табл. 7. Відносини між функціями автоматизації (табл. 3), завданнями обробки даних системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ (табл. 4) й об'єктами автоматизації (табл. 1) показані в табл. 8.

Таблиця 6 – Відповідність інформаційних елементів об'єктам автоматизації

<i>Об'єкти автоматизації</i>	<i>Інформаційні елементи</i>
<i>o₁</i>	<i>v₁ – v₁₈, v₆₀</i>
<i>o₂</i>	<i>v₁₉ – v₂₅, v₆₀</i>
<i>o₃</i>	<i>v₂₆ – v₃₀, v₆₀</i>
<i>o₄</i>	<i>v₃₁ – v₃₆, v₆₀</i>
<i>o₅</i>	<i>v₃₇ – v₄₂, v₆₀</i>
<i>o₆</i>	<i>v₄₃ – v₅₈, v₆₀</i>
<i>o₇</i>	<i>v₅₉, v₆₀</i>

Таблиця 7 – Відповідності «Експлуатаційний персонал – Функції автоматизації – Завдання обробки даних»

<i>Експлуатаційний персонал</i>	<i>Функції автоматизації</i>	<i>Завдання обробки даних</i>
<i>p₁</i>	<i>f₁ – f₂₂</i>	<i>h₁ – h₂₁</i>
<i>p₂</i>	<i>f₁ – f₂₂</i>	<i>h₁ – h₂₁</i>
<i>p₃</i>	<i>f₁ – f₂₂</i>	<i>h₁ – h₂₁</i>

Таблиця 8 – Відповідності «Функції автоматизації – Завдання обробки даних – Об'єкти автоматизації»

<i>Функції автоматизації</i>	<i>Завдання обробки даних</i>	<i>Об'єкти автоматизації</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>f₁</i>	<i>h₁</i>	<i>o₁</i>
<i>f₂</i>	<i>h₂</i>	<i>o₂</i>
<i>f₃</i>	<i>h₃</i>	<i>o₃</i>
<i>f₄</i>	<i>h₄</i>	<i>o₄</i>
<i>f₅</i>	<i>h₅</i>	<i>o₅</i>
<i>f₆</i>	<i>h₆</i>	<i>o₆</i>
<i>f₇</i>	<i>h₇</i>	<i>o₇</i>
<i>f₈</i>	<i>h₁₅</i>	<i>o₁</i>
<i>f₉</i>	<i>h₁₆</i>	<i>o₂</i>
<i>f₁₀</i>	<i>h₁₇</i>	<i>o₃</i>

Продовження табл. 8

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
f_{11}	h_{18}	o_4
f_{12}	h_{19}	o_5
f_{13}	h_{20}	o_6
f_{14}	h_{21}	o_7
f_{15}	h_{15}	o_1
f_{16}	h_{16}	o_2
f_{17}	h_{17}	o_3
f_{18}	h_{18}	o_4
f_{19}	h_{19}	o_5
f_{20}	h_{20}	o_6
f_{21}	h_{21}	o_7
f_{22}	$h_{1-h_{21}}$	o_{1-o_7}

Висновки. В роботі виконано обґрунтування особливостей структурного підходу до розробки автоматизованої системи збирання даних і моніторингу параметрів технічного стану транспортного засобу під час експлуатації в умовах ITS. Обґрунтовано і запропоновано підхід до формування математичних моделей оцінювання поточного і прогнозованого параметрів технічного стану автомобіля в умовах ITS при роботі в межах віртуального підприємства з експлуатації автомобільного транспорту і запропоновані інформаційні взаємодії залежностей для їх реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гриньків А. В. Використання методів прогнозування в керуванні технічним станом агрегатів та систем транспортних засобів / А. В. Гриньків // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2016. – Вип. 29. – С. 25–32
2. Говорущенко Н. Я. Системотехника автомобільного транспорту (расчетные методы исследований) : монографія / Н. Я. Говорущенко. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – 292 с.
3. Говорущенко Н. Я. Техническая эксплуатация автомобилей / Н. Я. Говорущенко. – Харьков : Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984. – 312 с.
4. Давиденко Л. В. Побудова інформаційного простору моніторингу ефективності енергоспоживання в системах комунального водопостачання / Л. В. Давиденко, В.А. Давиденко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2016. – Вип. 29. – С. 178–184
5. Волков В. П. Особливості формування інформаційної системи класифікації умов експлуатації транспортних засобів / В. П. Волков, І. В. Грицук, Ю. В. Грицук, Ю. В. Волков // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – К. : ДЕТУТ, 2017. – Вип. 30. – С. 84–94.
6. Тишковский Д. В. Особенности методики создания информационной системы предприятий хлебопекарной промышленности / Д. В. Тишковский // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – Режим доступа : URL: www.science-education.ru/104-6824 (дата обращения: 10.10.2012).
7. Атрощенко В. А. К вопросу выбора алгоритмов решения задачи синтеза оптимальных структур распределенных баз данных на предприятиях хлебопекарной промышленности / В. А. Атрощенко, Д. В. Тишковский // Пищевые технологии КубГТУ. – 2009. – № 4.
8. Атрощенко В. А. Технические возможности повышения ресурса автономных электростанций энергетических систем : монографія / В. А. Атрощенко, Ю. Д. Шевцов,

П. В. Яцынин, Р. А. Дьяченко, М. Н. Педько. – Краснодар : Издательский Дом-Юг, 2010. – 192 с.

9. Махаммад М. Д. Разработка информационной системы для дизельных электростанций с возможностями прогноза их технического состояния: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.01 / Махаммад Мааз Джасем Махаммад; ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет». – Краснодар, 2009. – 23 с.

10. Семантика (программирование) [Электронный ресурс] / Википедия - Свободная энциклопедия – Режим доступа : [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_\(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5))

11. Template: Real-time operating systems [Электронный ресурс] / Wikipedia, The Free Encyclopedia – Режим доступа : https://en.wikipedia.org/wiki/Template:Real-time_operating_systems.

12. Волков В. П. Интеграция технической эксплуатации автомобилей в структуре и прогресса интеллектуальной транспортной системы: монография / В. П. Волков, В. П. Матейчик, П. Б. Никонов [и др.] ; под. ред. В. П. Волкова. – Донецк: Изд-во «Ноудлидж» (Донецкое отделение), 2013. – 398 с.

13. Говорущенко Н. Я. Системотехника проектирования транспортных машин : учебное пособие / Н. Я. Говорущенко, А. Н. Туренко. – Х. : ХНАДУ, 2002. – 166 с.

14. Грицук І. В. Особливості формування предметної області і інформаційної системи оцінювання параметрів технічного стану транспортного засобу в умовах експлуатації / І. В. Грицук, Т. П. Білоусова, Ю. В. Грицук, Ю. В. Волков // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2017. – № 3 (62), Т. 1. – С. 302–306.

15. Волков В. П. Особливості формування методики застосування класифікації умов експлуатації транспортних засобів в інформаційних умовах ITS / В. П. Волков, І. В. Грицук, Ю. В. Грицук, Г. К. Шурко, Ю. В. Волков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 14 (1236). – С. 10–20.

REFERENCES

1. Hrynkiv, A. (2016) Using of forecasting techniques to manage the technical condition of aggregates and systems of vehicles [Vykorystannia metodiv prohnozuvannia v keruvanni tekhnichnym stanom ahrehativ ta system transportnykh zasobiv]. *Technic in agriculture, industrial machine building, automation [Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia]*. Vol. 29, 2016, pp. 25–32.

2. Hovorushchenko, N. (2011) *System technic of vehicles (calculation methods of research) [Systemotekhnika avtomobyl'noho transporta (raschetnye metody yssledovanyy)]*. Khar'kov, KhNADU Publ. 292 p.

3. Hovorushchenko, N. (1984) *Technical operation of cars [Tekhnicheskaya ekspluatatsiia avtomobyley]*. Khar'kov, Vyshcha shkola Publ. 312 p.

4. Davydenko, L. & Davydenko, V. (2016) The construction of information space of monitoring of efficiency of energy consumption in municipal water supply system [Pobudova informatsiinoho prostoru monitorynhu efektyvnosti enerhospozhyvannia v systemakh komunalnoho vodopostachannia] *Technic in agriculture, industrial machine building, automation [Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia]*. Vol. 29, pp. 178–184

5. Volkov, V.P., Gritsuk, I.V., Gritsuk Yu.V. & Volkov Yu.V. (2017) Specifically, formulating the information systems of the classification of the minds of transport interventions [Osoblyvosti formuvannia informatsiinoi systemy klasyfikatsii umov ekspluatatsii transportnykh zasobiv] *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport Ministry*

of Education and Science of Ukraine series «Transport Systems and Technologies» [Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnolohichnoho universytetu transportu Ministerstva osvity i nauky Ukrainy: Seriiia «Transportni systemy i tekhnohii»]. Vol. 30, 2017, pp. 84–94.

6. Tishkovskiy, D. Features of the methodology for creating an information system for bakery industry enterprises [Osobennosti metodiki sozdaniya informatsionnoy sistemyi predpriyatiy hlebopekarnoy promyishlennosti] *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2012. issue 4. Available at: www.science-education.ru/104-6824.

7. Atroschenko, V. & Tishkovskiy, D. On the choice of algorithms for solving the problem of synthesis of optimal structures of distributed databases at bakery enterprises [K voprosu vyibora algoritmov resheniya zadachi sinteza optimalnykh struktur raspredelennykh baz dannykh na predpriyatiyakh hlebopekarnoy promyishlennosti] *Pischevyye tehnologii KubGTU – Food technologies of Kuban State Technical University*. 2009. Issue 4.

8. Atroschenko, V., Shevtsov, Yu., Yatsyinin, P., Dyachenko, R. & Pedko, M. *Technical possibilities of increasing the life of autonomous power plants of power systems. Monograph* [Tehnicheskyye vozmozhnosti povysheniya resursa avtonomnykh elektrostantsiy energeticheskikh sistem. Monografiya.] Krasnodar, Izdatelskiy Dom Yug, 2010, 192 p.

1. 9 Mahammad M.D. *Razrabotka informatsionnoy sistemyi dlya dizelnykh elektrostantsiy s vozmozhnostyami prognoza ih tehnikeskogo sostoyaniya*. Avtoreferat Diss. [Development of an information system for diesel power plants with the possibility of forecasting their technical condition. Author's abstract]: Krasnodar, 2009. 23 p.

9. Semantyka (prohrammyrovanye) / Wikipedia, The Free Encyclopedia. wikipedia.org Retrieved from [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_\(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5))

10. Template: Real-time operating systems / Wikipedia, The Free Encyclopedia. wikipedia.org Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Template:Real-time_operating_systems

11. Volkov, V.P., Mateichyk, V.P., Nikonov P.B. & other (2013) Integration of technical operation of cars in the structure and progress of an intelligent transport system: monograph [Yntehratsyya tekhnicheskoy ekspluatatsyy avtomobylei v strukture y prohressy yntellektualnoy transportnoy systemy: monografiya]. Donetsk, Noulidzh (Donetsk dep.). 398 p.

12. Hovorushchenko, N.Ya & Turenko A.N. (2002) Systems engineering design of transport machines: [textbook] [Systemotekhnika proektyrovaniya transportnykh mashyn: [uchebnoe posobyey]] Khar'kov, KhNADU Publ. 166 p.

13. Gritsuk, I.V., Bilousova, T.P., Gritsuk, Yu.V. & Volkov, Yu.V. (2017) Features of the formation of the subject area and the information system for evaluating the parameters of the technical condition of the vehicle in the conditions of exploitation [Osoblyvosti formuvannya predmetnoi oblasti i informatsiinoi systemy otsiniuvannya parametriv tekhnichnoho stanu transportnoho zasobu v umovakh ekspluatatsii] *Vestnik Kherson National Technical University* [Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu]. Issue1, Vol. 3 (32), 2017, pp. 302–306.

14. Volkov, V.P., Gritsuk, I.V., Gritsuk, Yu.V., Shurko, G.K. & Volkov Yu.V. (2017) Features of the formation of a methodology for the classification of conditions of vehicle operation in the information conditions ITS [Osoblyvosti formuvannya metodyky zastosuvannya klasyfikatsii umov ekspluatatsii transportnykh zasobiv v informatsiinykh umovakh ITS] *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Collection of scientific works. Series: Transport engineering* [Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriiia: Transportne mashynobuduvannya]. Vol. 14 (1236), 2017, pp. 10–20.

Волков В. П., Грицук И. В., Грицук Ю. В., Волков Ю. В. СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В работе представлено обоснования структурного подхода к разработке автоматизированной системы сбора данных и мониторинга параметров технического состояния транспортного средства во время эксплуатации в условиях ITS. Обоснован и предложен подход к формированию математических моделей оценивания текущего и прогнозируемого параметров технического состояния автомобиля в условиях ITS при работе в виртуальном предприятии по эксплуатации автомобильного транспорта. Определены основные информационные элементы объектов автоматизации транспортного средства. Реализован анализ информационной модели предметной области транспортного средства. Предложены информационные взаимодействия зависимостей для реализации.

Ключевые слова: сбор данных, мониторинг, параметр, транспортное средство, математическая модель.

Volkov V. P., Gritsuk I. V., Gritsuk Yu. V. & Volkov Yu. V. STRUCTURAL APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED DATA COLLECTION SYSTEM AND MONITORING PARAMETERS OF THE VEHICLE TECHNICAL CONDITIONS

The paper presents the rationale for the structural approach to the development of an automated data collection system and monitoring parameters of the vehicle technical conditions during the operation in ITS conditions. The approach to the formation of mathematical models for estimating the current and predicting the parameters of the vehicle technical condition under ITS conditions when operating in a virtual enterprise for the operation of road transport is substantiated and proposed. The basic informational elements of automation vehicle's objects are determined. The analysis of the information model of the vehicle subject area is carried out. The information interactions of dependencies for implementation is suggested.

Keywords: data collection, monitoring, parameter, vehicle, mathematical model.

© Волков В. П., Грицук И. В., Грицук Ю. В., Волков Ю. В.

Статтю прийнято
до редакції 4.06.17

УДК.621.313.333

РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ОМЕДНЕННЫМ МАССИВНЫМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ РОТОРОМ

Ищенко И. М., к.т.н., доцент, профессор кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: ecezakaf@gmail.com;

Голощапов С. С., к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: ecezakaf@gmail.com

Повышение эксплуатационных показателей существующих электроприводов является одной из наиболее важных задач современной судовой энергетики. Двигатели с массивными роторами, отличаясь своей простотой в изготовлении и дешевизной, в то же время требуют улучшения эксплуатационных показателей. Один из вариантов с возможностями использования достижений современных нанотехнологий – омеднение поверхности ротора. Предлагаемая методика расчета параметров двигателей с массивными омедненными роторами позволяет относительно просто оптимизировать толщину покрытия ротора, в частности, и геометрию машины в целом, рассчитать ее пусковые и рабочие характеристики.

Ключевые слова: массивный ротор, напряженность магнитного поля, магнитная проницаемость, скольжение.

Введение. Преимуществами двигателей с массивными роторами являются высокая кратность пускового момента с одновременным снижением пускового тока, повышенная прочность ротора, что позволяет существенно повысить рабочие скорости двигателя.

Однако такие двигатели, по сравнению с традиционными, имеют относительно низкие энергетические показатели – к.п.д. и $\cos\varphi$, что препятствует их широкому использованию.

Наиболее эффективный способ улучшения энергетических показателей двигателей с массивными роторами при сохранении их положительных особенностей – покрытие поверхности ротора тонким слоем высокопроводящего материала (обычно медью). Омеднение ферромагнитного ротора позволяет уменьшить как активное, так и индуктивное сопротивление вторичной цепи, улучшив рабочие характеристики двигателя.

Актуальность. Многие современные электроприводы судового оборудования (брашпили, якорно-швартовые устройства, грузовые лебедки и т.п.) зачастую требуют от двигателей улучшенных пусковых характеристик. В то же время, в связи с кратковременным режимом работы, не обязательными являются высокие эксплуатационные параметры: к.п.д. и $\cos\varphi$. Этим требованиям отвечают асинхронные двигатели с массивными роторами с улучшенными энергетическими показателями.

Целью статьи является разработка относительно простой методики расчета характеристик и эксплуатационных параметров двигателя с омедненным массивным ротором, оптимизации толщины медного покрытия.

На практике двигатели с массивным ротором изготавливают на базе готового статора серийной асинхронной машины путем замены обычного ротора с беличьей клеткой на массивный. При этом параметры статора берутся из каталога либо рассчитываются как для обычного двигателя с беличьей клеткой. Так как мощность двигателя с массивным ротором составляет 40–50 % от мощности традиционного двигателя, при длительном режиме работы необходимо за исходный взять двигатель удвоенной мощности. Если же двигатель предназначен для кратковременного режима работы (например, двигатель брашпиля), такой запас по мощности не требуется.

Расчет параметров массивного ротора:

1. Задаем величину эквивалентного приведенного тока ротора I_2^1 .
2. Рассчитываем м.д.с., действующую на массивный ротор:

$$F = 2,7 \frac{w_1 k_{w1}}{p} I_2^1,$$

где w_1 – число витков обмотки статора, k_{w1} – обмоточный коэффициент обмотки статора, p – число пар полюсов двигателя.

3. Определяем расчетную величину действующего значения напряженности магнитного поля на поверхности массивного ротора:

$$H_e = \frac{F}{\sqrt{2} k_H \tau},$$

где $k_H \approx 0,63$ – коэффициент, учитывающий неравномерный характер распределения магнитной индукции вдоль полюсного деления, τ – полюсное деление двигателя.

4. Исходя из уравнений Неймана Л. Р. [1] для единичного комплексного сопротивления $Z_{(1)}$ участка массивного магнитопровода:

$$Z_{(1)} = \dot{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_e}};$$

$$R_{(1)} = \operatorname{Re} \dot{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_e}};$$

$$X_{(1)} = \operatorname{Im} \dot{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_e}},$$

где γ – удельная электрическая проводимость материала магнитопровода ротора, μ_e – значение магнитной проводимости материала магнитопровода, найденное из основной кривой намагничивания по действующему значению H_e напряженности магнитного поля:

$$\dot{A} = 1,13 + j1,85,$$

по кривым рис. 1–5 [2] и рассчитанной напряженности поля H_e определяем модуль комплексного значения единичного магнитного сопротивления $Z_{(1)}$ при 20 °С.

Полученное значение $Z_{(1)}$ раскладываем на действительную $R_{(1)}$ и мнимую $X_{(1)}$ части с соотношением $\frac{R_{(1)}}{X_{(1)}} = \frac{1,13}{1,85} \approx 0,6$, т.е. получаем:

$$Z_{(1)} = R_{(1)} + jX_{(1)}.$$

5. Приводим сопротивление $Z_{(1)}$ к расчетной рабочей температуре $t \approx 130^\circ \text{C}$:

$$Z_{(1)t} = \frac{R_{(1)} + jX_{(1)}}{\sqrt{1 + \alpha(t - 20)}} = R_{(1)t} + jX_{(1)t},$$

где $\alpha \approx 0,005$ – температурный коэффициент сопротивления стали.

6. По величине относительной длины машины:

$$\Lambda = \frac{l}{\tau},$$

где l – длина активной части двигателя, и из [2] по рис. 1–15 определяем коэффициент k_{Λ} , учитывающий влияние относительной длины массивного ротора на его эквивалентные параметры.

7. Рассчитываем эквивалентные приведенные параметры массивного ротора при заданной частоте как:

$$z_2^1 = r_2^1 + jx_2^1 = \frac{j\pi \cdot m \cdot \sqrt{f} \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2}{(R_{(1)t} + jX_{(1)t}) \cdot k_{\Lambda} \cdot p},$$

где f – частота сети, m – число фаз.

Поскольку глубина проникновения электромагнитного поля в тело ротора обратно пропорциональна \sqrt{f} [3], зависимость параметров r_2^1 и x_2^1 от скольжения S определяется формулами:

$$r_{2s}^1 = \frac{r_2^1}{\sqrt{S}}, \quad x_{2s}^1 = \frac{x_2^1}{\sqrt{S}} = 0,6r_{2s}^1.$$

Параметры r_2^1 и $x_2^1 \approx 0,6r_2^1$ принимаются как приведенные к статору значения активного и реактивного сопротивления ферромагнитной части ротора. Указанное соотношение между активной и реактивной составляющей полного сопротивления массивного ротора не зависит ни от частоты его перемагничивания (т.е. от скольжения), ни от магнитного состояния материала массивного ротора [2, 3].

Уточненное значение тока I_2^1 определяется как:

$$I_2^1 = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(x_1 + x_{2s}^1)^2 + (r_1 + r_{2s}^1)^2}}.$$

Если полученное значение значительно отличается от принятого в п.1, необходимо учесть следующее.

Рассчитанные таким образом r_2^1 и $x_2^1 \approx 0,6r_2^1$ соответствуют тому значению расчетной магнитной проницаемости μ_e на поверхности массивного ротора, которое имеет место при величине приведенного тока ротора I_2^1 , которым задались в п.1.

Для всех других значений этого тока параметры массивного ротора могут быть получены путем пересчета по формуле:

$$r_2^{11} = r_2^1 \left(\frac{I_2^1}{I_2^{11}} \right)^{\frac{3}{7}}, \quad x_2^{11} \approx 0,6r_2^{11}.$$

где r_2^{11} и x_2^{11} – значения параметров массивного ротора, соответствующие току I_2^{11} .

8. Учет медного покрытия ротора.

При омедненном роторе во вторичном контуре схемы замещения появляется параллельно r_{2s}^1 и x_{2s}^1 вторая ветвь, соответствующая активному и реактивному сопротивлению медного покрытия. Если пренебречь индуктивным сопротивлением покрытия и учесть, что $x_2^1 \approx 0,6r_2^1$, то получим эквивалентные активные и индуктивные сопротивления омедненного ротора, приведенные к обмотке статора:

$$r_{2\vartheta}^1 = \frac{r_{2s}^1 \cdot r_{\Delta s}^1 (1,36r_{2s}^1 + r_{\Delta s}^1)}{1,36(r_{2s}^1)^2 + 2r_{2s}^1 \cdot r_{\Delta s}^1 + (r_{\Delta s}^1)^2};$$

$$x_{2\vartheta}^1 = \frac{0,6r_{2s}^1 \cdot (r_{\Delta s}^1)^2}{1,36(r_{2s}^1)^2 + 2r_{2s}^1 \cdot r_{\Delta s}^1 + (r_{\Delta s}^1)^2}$$

где

$$r_{\Delta s}^1 = \frac{r_{\Delta}^1}{s};$$

$r_{\Delta}^1 = \frac{4m \cdot l \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2}{\pi D} k_n \frac{\rho_m}{\Delta_m}$ – приведенное активное сопротивление медного покрытия,

m – число фаз; $k_n = 1 + \frac{2\tau}{\pi \cdot l}$ – коэффициент, учитывающий влияние торцевых частей

омедненного ротора, D – диаметр расточки статора, ρ_m – удельное сопротивление меди при температуре $t \approx 130^\circ C$, Δ_m – толщина медного покрытия.

9. Расчет пусковых и рабочих характеристик.

После этого рассчитываются и строятся пусковые и рабочие характеристики:

$$M = f(s);$$

$$M = \frac{mU_{\phi}^2 r_{2\vartheta}^1}{\omega_0 [(x_1 + x_{2\vartheta}^1)^2 + (r_1 + r_{2\vartheta}^1)^2]},$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, x_1 и r_1 – индуктивное и активное сопротивление обмотки статора соответственно и

$$I_2^1 = f(s);$$

$$I_2^1 = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(x_1 + x_{2\vartheta}^1)^2 + (r_1 + r_{2\vartheta}^1)^2}};$$

$$I = f(s), \cos \varphi = f(s).$$

При этом можно принять $I \approx I_2^1 + I_{0\mu}$, где $I_{0\mu}$ – намагничивающий ток (реактивная составляющая тока холостого хода).

Приведенная схема замещения (рис. 1) иллюстрирует изложенную методику.

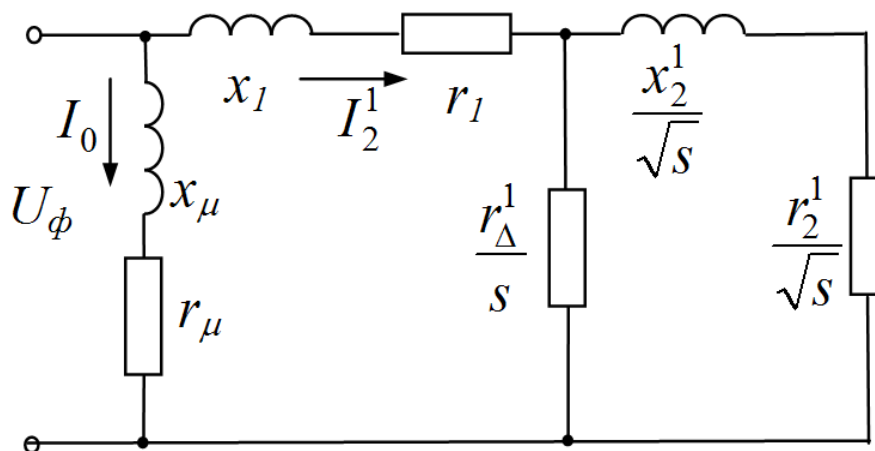


Рисунок 1 – Схема замещения двигателя с омедненным массивным ферромагнитным ротором

Выводы. Предложенная методика позволяет повысить точность расчета параметров и характеристик асинхронных машин с омедненными ферромагнитными роторами, сократить объем вычислений с учетом всех существующих физических явлений и факторов, присутствующих в массивных ферромагнитных роторах, определить оптимальные материалы и толщину медного покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л. Р. Нейман. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1949. – 189 с.
2. Куцевалов В. М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / В. М. Куцевалов. – М. – Л. : Энергия, 1966. – 304 с.
3. Постников И. М. Проектирование электрических машин / И. М. Постников. – К. : Гос. изд-во техн. литер. УССР, 1960. – 910 с.

REFERENCES

1. Neuman L. R. Superficial effect in the ferromagnetic bodies / L. R. Neuman. – M. – L. : Gosenergoizdat, 1949. – 189 p.
2. Kutsevalov V. M. Questions of theory and calculation of asynchronous machines with the massive rotors / V. M. Kutsevalov. – M. – L. : Energy, 1966. – 304 p.
3. Postnikov I. M. Planning of electric machines / I. M. Postnikov – K. : State publish of technical literature Ukraine, 1960. – 910 p.

Іщенко І. М., Голощанов С. С. РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ОБМІДНЕНИМ МАСИВНИМ ФЕРОМАГНІТНИМ РОТОРОМ

Підвищення експлуатаційних показників електроприводів є одним з найбільш важливих завдань сучасної суднової енергетики. Двигуни з масивними роторами, відрізняючись своєю простотою у виготовленні й дешевизною, у той же час вимагають поліпшення експлуатаційних показників. Один із варіантів з можливостями використання досягнень сучасних нанотехнологій – оміднення поверхні ротора. Запропонована методика розрахунків параметрів двигунів з масивними обмідненими роторами дозволяє відносно просто оптимізувати товщину покриття ротора, зокрема, й геометрію машини в цілому, розрахувати її пускові й робочі характеристики.

Ключові слова: масивний ротор, напруженість магнітного поля, магнітна проникність, ковзання.

Ischenko I. M., Goloschapov S. S. CALCULATING OF ASYNCHRONOUS ENGINE WITH COPPER COVERAGING MASSIVE FERROMAGNETIC ROTOR

The increase of operating indexes of existent electromechanics is one of the most essential tasks of modern ship energy. Engines with massive rotors, differing in the simplicity in making and cheapness, at the same time require the improvement of operating indexes. One of variants with possibilities of drawing on accomplishments of modern nanotechnologies is copper surface coveraging of rotor. The offered methodology of calculation of parameters of engines with massive copper coveraging rotors allows to optimize the thickness of coverage of rotor in particular and geometry of machine on the whole in a relatively simple way, to count its starting and working characteristics.

Keywords: massive rotor, tension of magnetic-field, permeance, skidding.

© Іщенко І. М., Голощяпов С. С.

Статтю прийнято
до редакції 27.03.17

НОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЛАНКОВСКИХ ВЕЛИЧИН ВРЕМЕНИ, ДЛИНЫ И МАССЫ

Настасенко В. А., к.т.н., доцент кафедры транспортных технологий Херсонской государственной морской академии, e-mail: Nastasenko2004@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5429-8389

В работе проведен анализ полученных М. Планком в 1900 г. величин длины, времени и массы, вытекающих из 3-х фундаментальных физических констант: скорости света в вакууме, гравитационной постоянной G , круговой постоянной Планка \hbar . Показано, что замена круговой постоянной Планка \hbar общей постоянной h позволяет получить новые значения Планковских величин длины, времени и массы, времени, которые реально связаны с параметрами материального мира. На этой базе в рамках строгих физических закономерностей, в гравитационной постоянной G была выделена Планковская частота, которая является частотой гравитационного поля Вселенной, составляющего основу материального мира. Её использование позволяет упростить определение Планковских величин длины, времени и массы и исключить в них двойственность толкования, вытекающую из четности квадратичных функций $\pm\sqrt{\quad}$. Это позволяет полагать, что антивремени, антидлины и антимассы в реальной Вселенной не существует, что требует коррекции соответствующих космологических теорий.

Ключевые слова: фундаментальные физические константы, Планковские величины длины, времени и массы.

Введение Работа относится к области квантовой физики и основ материального мира, в частности – к волнам и физическим полям, связанным с Планковскими величинами длины, времени и массы, полученными на базе 3-х фундаментальных физических констант: гравитационной постоянной G , постоянной Планка h и скорости c света в вакууме. Обоснованию основ материального мира посвящены работы многих ведущих научных школ и ученых мира, занимающихся глобальными проблемами естествознания, поскольку их решение имеет большой теоретический и практический интерес для познания основ мироздания и Вселенной в целом. Решение данных задач является актуальным для развития физики и других естественных наук, в условиях постоянной потребности расширения знаний о материальном мире и Вселенной.

Анализ состояния проблемы и постановка задачи. Найденные М. Планком еще в 1900 г. особые физические величины [1]: – Планковская длина l_p^o (1), Планковское время t_p^o (2) и Планковская масса m_p^o (3), были получены на базе строгих физических закономерностей:

$$l_p^o = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = \sqrt{\frac{1,054571726 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right)}{\left[0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right)\right]^3}} = 1,61621 \cdot 10^{-35} (\text{м}), \quad (1)$$

$$t_p^o = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = \sqrt{\frac{1,054571726 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right)}{\left[0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right)\right]^5}} = 5,39109 \cdot 10^{-44} (\text{с}), \quad (2)$$

$$m_p^o = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = \sqrt{\frac{1,054571726 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)}{6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right)}} = 2,17650 \cdot 10^{-8} (\text{кг}).$$

где \hbar – круговая постоянная Планка [2]:

$$\hbar = 1,054571726 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \quad (4)$$

c – скорость света в вакууме [2]:

$$c = 0,299792458 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (5)$$

G – гравитационная постоянная [3]:

$$G = 6,67390 \pm 0,000130 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \quad (6)$$

До работы [4] их считали абстрактными величинами, поскольку масса покоя электрона $m_e = 9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ [1], что на 23 порядка меньше Планковской массы $m_p^o = 2,17650 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$, а его классический радиус $r_e = 2,8179409 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ [1], что на 20 порядков больше Планковской длины $l_p^o = 1,61621 \cdot 10^{-35} \text{ м}$. Такое противоположное соотношение противоречит гармонии масс и размеров, сложившееся в материальном мире, поэтому вынуждает считать все Планковские параметры l_p^o, t_p^o, m_p^o , полученные на базе одних и тех же констант c, G, \hbar , и по сходным физическим законам (1)...(3), абстрактными величинами, которые могли характеризовать состояние Вселенной лишь в начальный момент ее рождения.

В работах [4, 5] была показана реальность Планковских величин l_p^o, t_p^o, m_p^o , как параметров Планковских слоев толщиной l_p^o , которые послойно охватывают все пространство шаровой Вселенной. Поскольку в рамках наблюдаемой Вселенной возраста $T_B = 10 \dots 12$ млрд. лет [6], количество квантов пространства в 1-м слое может составлять величину 10^{122} [4, 5], распределение Планковской массы $m_p^o = 2,17650 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$ в таком количестве квантов устраняет дисгармонию масс и размеров. При этом строго согласуются соотношения Планковской массы m_p^o и длины l_p^o с размерными R_B и массовыми M_B характеристики наблюдаемой Вселенной при любом ее возрасте T_B (7) [4, 5, 7, 8], которые вытекают из закона Всемирного тяготения [1] и подтверждаются соотношением скорости c света в вакууме и величины гравитационной постоянной G в рамках зависимости (8):

$$T_B = (10 \dots 12) \cdot 10^9 (\text{лет}) \cdot 365,24 (\text{суток}) \cdot 86400 (\text{с}) = (3,16 \dots 3,79) \cdot 10^{17} (\text{с}). \quad (7)$$

$$\frac{M_B}{R_B} = \frac{m_p^o}{l_p^o} = \frac{c^2}{G} = \frac{2,17650 \cdot 10^{-8} (\text{кг})}{1,61621 \cdot 10^{-35} (\text{м})} = \frac{\left[0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)\right]^2}{6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}\right)} = 1,34667 \cdot 10^{27} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}}\right). \quad (8)$$

На базе полученного доказательства реальности Планковских величин была обоснована возможность их применения в научных исследованиях.

Развитие таких возможностей составляет главную цель выполняемой работы. Ее научную новизну составляет углубление и уточнение знаний об основах строения материального мира на уровне Планковских величин.

Обоснование пути достижения поставленной цели. Учитывая доказанную в работах [4, 5, 7, 8] реальность Планковских величин, была выдвинута 1-я гипотеза о возможности их квантования с другими такими же физическими величинами макро- и микроуровней, в частности с 1 метром (м), 1 секундой (с), 1 килограммом (кг). Но их кратности n , как основного признака квантования, так и не была выявлено (9)...(11):

$$n_l = \frac{1(\text{м})}{l_p^o} = \frac{1(\text{м})}{1,61621 \cdot 10^{-35}(\text{м})} = 6,16731 \cdot 10^{34}, \quad (9)$$

$$n_t = \frac{1(\text{с})}{t_p^o} = \frac{1(\text{с})}{5,39109 \cdot 10^{-44}(\text{с})} = 1,85491 \cdot 10^{43}, \quad (10)$$

$$n_m = \frac{1(\text{кг})}{m_p^o} = \frac{1(\text{кг})}{2,17650 \cdot 10^{-8}(\text{кг})} = 4,59453 \cdot 10^7. \quad (11)$$

Однако анализ величин (1)...(3) в работе [9] привел к пониманию условности введения круговой постоянной Планка \hbar (4), полученной делением постоянной Планка h (12) на число 2π (13), что ограничивает полученные на ее базе Планковские величины l_p^o, t_p^o, m_p^o внутренними параметрами минимального кванта пространства Вселенной:

Постоянная Планка [2]:

$$h = 6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad (12)$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{2 \cdot 3,14159256} = 1,054571726 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (13)$$

Поэтому, по аналогии с (1)...(3), на базе исходной величины постоянной Планка h (12), были определены естественные или внешние Планковские величины l_p, t_p, m_p (14)...(16), характеризующие минимальный квант пространства Вселенной:

$$l_p = \sqrt{\frac{hG}{c^3}} = \sqrt{\frac{6,62606957 \cdot 10^{-34}(\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \right)}{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \right)^3}} = 4,05123 \cdot 10^{-35}(\text{м}), \quad (14)$$

$$t_p = \sqrt{\frac{hG}{c^5}} = \sqrt{\frac{6,62606957 \cdot 10^{-34}(\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \right)}{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \right)^5}} = 13,5134 \cdot 10^{-44}(\text{с}), \quad (15)$$

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = \sqrt{\frac{6,62606957 \cdot 10^{-34}(\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)}{6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \right)}} = 5,45568 \cdot 10^{-8}(\text{кг}). \quad (16)$$

При этом зависимость (8) не теряет своей достоверности, поскольку новая Планковская масса m_p и длина l_p изменились по сравнению с исходными m_p^o и l_p^o на одну и ту же величину: $\sqrt{2\pi}$.

Анализ Планковских величин (14)...(16) на квантование с 1 метром, 1 секундой и 1 килограммом дал следующие результаты (17)...(19):

$$n_l = \frac{1(\text{м})}{l_p} = \frac{1(\text{м})}{4,05123 \cdot 10^{-35}(\text{м})} = 2,46839 \cdot 10^{34}, \quad (17)$$

$$n_t = \frac{1(\text{с})}{t_p} = \frac{1(\text{с})}{13,5134 \cdot 10^{-44}(\text{с})} = 7,40006 \cdot 10^{42}, \quad (18)$$

$$n_m = \frac{1(\text{кг})}{m_p} = \frac{1(\text{кг})}{5,45568 \cdot 10^{-8}(\text{кг})} = 1,83295 \cdot 10^7. \quad (19)$$

Таким образом, была выявлена потенциальная возможность квантования 1-й секунды и Планковского времени t_p , совпадающие в пределах точности исходной расчетной величины t_p , составляющей 6 знаков (15) с числом $7,4 \cdot 10^{42}$ (18). Однако для других величин Интернациональной системы измерений [10]: 1 метра и 1 килограмма совпадений не выявлено, что требует дополнительного анализа данных значений.

Проведенный анализ исходных величин: 1 метра, 1 секунды и 1 килограмма [10] показал, что 1 метр, как единица измерения, изначально был выбран равным 1/10000000 доле $\frac{1}{4}$ Парижского меридиана, т.е. является весьма условной единицей, которая затем оказалась определенной неточно. Изначально 1 килограмм, как единица измерения, был выбран равным массе дистиллированной воды, заполняющей кубическую емкость со стороной 0,1 м, т.е. также является условной единицей, производной от первой условной единицы 1 (м). А 1 секунда, как единица измерения, изначально была выбрана равной 1/86400 доле Земных суток, длящихся в период весеннего равноденствия, 21 марта, т.е. является строго обоснованной астрономической величиной, связанной с вращением Земли вокруг собственной оси и ее движением вокруг Солнца в зоне среднего радиуса эллиптической орбиты [10]. В этом случае есть все основания считать квантование величины 1 секунды с Планковским временем t_p неслучайным явлением, поскольку вероятность случайного совпадения 2-х величин до 5-ти знаков может быть оценена, как $P = 10^{-5}$. Кроме того, численная величина (18) является Планковской частотой ν_p (20), т.е. реальной физической величиной, которой обладает гравитационное поле Вселенной [11, 12]:

$$\nu_p = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{13,5134 \cdot 10^{-44}(\text{с})} = 7,40006 \cdot 10^{42}(\text{с}^{-1}). \quad (20)$$

Эта величина ν_p вытекает из строгих зависимостей (21), (22), найденных в работах [11, 12] и связана она с гравитационным полем Вселенной, поскольку именно его характеризует гравитационная постоянная G :

$$G = \frac{t_p^2 c^5}{h} = \frac{c^5}{\nu_p^2 h}. \quad (21)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{c^5}{Gh}} = \sqrt{\frac{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{M}{c}\right)\right)^5}{6,67390 \cdot 10^{-11} \left(\frac{M^3}{\kappa^2 \cdot c^2}\right) \cdot 6,62606957 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot c)}} = 7,40004 \cdot 10^{42} (c^{-1}). \quad (22)$$

Поэтому квантование частот гравитационного поля Вселенной v_p с частотой гравитационного поля Земли и Солнечной системы – реально и закономерно, т.к. эти поля относятся к физическим объектам одного и того же вида и связаны между собой общими законами гравитации.

Аналогично квантуется Планковская длина l_p с другой системной величиной – расстоянием, которое свет проходит в вакууме со скоростью c за 1 секунду (23):

$$n = \frac{c \cdot 1(c)}{l_p} = \frac{0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{M}{c}\right) \cdot 1(c)}{4,05123 \cdot 10^{-35} (M)} = 7,40004 \cdot 10^{42}, \quad (23)$$

Также квантуются выделившиеся за 1 секунду Планковская энергия E_p и масса m_p (24), в рамках открытого Эйнштейном закона связи энергии и массы $E = mc^2$ [13]:

$$n = \frac{E_p \cdot 1(c)}{h} = \frac{m_p c^2 \cdot 1(c)}{h} = \frac{5,45568 \cdot 10^{-8} (\kappa^2) \cdot \left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{M}{c}\right)\right)^2 \cdot 1(c)}{6,62606957 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot c)} = 7,40004 \cdot 10^{42} \quad (24)$$

Квантование во Вселенной величин времени (18), длины (23), массы и энергии (24) с конечной точностью до 5 знаков сводит вероятность их случайного совпадения к величине $P = 10^{-5} \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-5} = 10^{-15}$, при этом последние цифры величин n зависят от округления t_p , l_p , m_p . что дает основания считать подтвержденной 1-ю гипотезу выполняемой работы и принять величину (22) точной квантовой частотой (25):

$$v_p = 7,4 \cdot 10^{42} c^{-1}. \quad (25)$$

Таким образом, можно строго утверждать, что выделена новая фундаментальная константа Вселенной – Планковская частота (далее константа квантовой частоты Настасенко), что раскрывает новые возможности для познания основ материального мира. При этом совокупность полученных эффектов квантования Планковских частот, времени, длины, с реальной космической величиной времени 1 (с) Интернациональной системы измерений, а также Планковской энергии и массы – с реальной скоростью света в вакууме, еще раз на строгой основе подтверждает реальность всех Планковских параметров l_p , t_p , m_p .

Новые возможности расширения знаний о материальном мире при строгом квантовании частоты Настасенко. На базе зависимости (21) точное значение v_p (25) позволяет более точно определить величину гравитационной постоянной G (26):

$$G = \frac{t_p^2 c^5}{h} = \frac{c^5}{v_p^2 h} = \frac{\left(0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{M}{c}\right)\right)^5}{\left(7,4 \cdot 10^{42} (c^{-1})\right)^2 \cdot 6,62606957 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot c)} = 6,67396744 \cdot 10^{-11} \left(\frac{M^3}{\kappa^2 \cdot c^2}\right). \quad (26)$$

Экспериментальное уточнение гравитационной постоянной до полученных в расчетах 9-ти знаков (26) в реальных условиях Земли или доступного для современных исследований космического пространства, практически невозможно [13, 14].

На базе точного значения v_p можно также более точно определить величину Планковского времени t_p (27):

$$t_p = \frac{1}{v_p} = \frac{1}{7,4 \cdot 10^{42} (c^{-1})} = 13,5 | 135 | \dots \cdot 10^{-44} (c). \quad (27)$$

Анализ значения (27) показывает его строгую периодичность. Признак строгой периодичности проявляется также в значении (26). На этой базе в работе [15] была выдвинута 2-я гипотеза – о периодичности фундаментальных физических констант, что позволяет внести периодическую дробь |6739| в гравитационную постоянную (28) и уточнить ее более, чем на 9 знаков:

$$G = 6,6739|6739|\dots \cdot 10^{-11} \frac{M^3}{\kappa^2 \cdot c^2}. \quad (28)$$

В этом случае, на базе зависимости (29), возможно уточнение постоянной Планка, в которой также проявляется признак периодичности |61|, но она исчезает после 12-го знака:

$$h = \frac{c^5}{v_p^2 G} = \frac{\left[0,299792458 \cdot 10^9 \left(\frac{M}{c}\right)\right]^5}{\left[7,4 \cdot 10^{42} (c^{-1})\right]^2 6,6739|6739| \cdot 10^{-11} \left(\frac{M^3}{\kappa^2 \cdot c^2}\right)} = 6,629069616158 \cdot 10^{-34} (Дж \cdot c). \quad (29)$$

Объяснить это можно тем, что физические законы на квантово-механическом уровне материального мира, в рамках принципа неопределенности Гейзенберга, имеют статистический характер [13] и 12 знаков – предел статистической точности для всех фундаментальных физических констант, для которых предлагаемые и известные значения и их точность приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение численных значений предлагаемых и известных фундаментальных физических констант G, h, c, v_p

Предлагаемое численное значение	Известное в настоящее время численное значение
Гравитационная постоянная $G, \left(\frac{M^3}{\kappa^2 \cdot c^2}\right)$;	
$(6,673967396739 + 0,000000000001) \cdot 10^{-11}$	$(6,67390 \pm 0,00013) \cdot 10^{-11}$
Постоянная Планка $h, \left(\frac{\kappa^2 \cdot M^2}{c}\right)$	
$(6,62606961616 - 0,000000000002) \cdot 10^{-34}$	$(6,62606957 \pm 0,00000029) \cdot 10^{-34}$
Скорость света в вакууме $c, \left(\frac{M}{c}\right)$	
$(0,2997924580000 + 0,0000000000003) \cdot 10^9$	$0,29979245810^9$
Постоянная квантовой частоты Настасенко $v_p (c^{-1})$	
$(7,400000000000 + 0,000000000001) \cdot 10^{42}$	$(7,40004 \pm 0,00002) \cdot 10^{42}$

На базе точного значения v_p (25) можно выразить Планковское время t_p более простой строгой физической зависимостью (30):

$$t_p = v^{-1} = \frac{1}{7,4 \cdot 10^{42} (s^{-1})} = 13,5 | 135 | \dots \cdot 10^{-44} (c). \quad (30)$$

Планковскую длину l_p также можно выразить более простой строгой физической зависимостью (31):

$$l_p = \frac{c}{\nu_p} = \frac{0,299792458 \cdot 10^9 (\text{м} / \text{с})}{7,4 \cdot 10^{42} (\text{с}^{-1})} = 4,51294432 | 432 | \dots \cdot 10^{-35} (\text{м}). \quad (31)$$

Планковскую массу m_p также можно выразить более простой строгой физической зависимостью (32):

$$m_p = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{6,62606961616 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 7,4 \cdot 10^{42} (\text{с}^{-1})}{[0,299792458 \cdot 10^9 (\text{м} / \text{с})]^2} = 5,455647580077 \cdot 10^{-8} (\text{кг}). \quad (32)$$

При этом точность численных значений (30)...(32) также возрастает.

На базе строгой зависимости (32) можно получить новый физический смысл Планковской массы, как остановленного движения энергии. Остановленное движение является общей характеристикой массы, поскольку на рычажных весах определить ее можно лишь при остановке движения коромысла, а на пружинном динамометре – при остановке движения пружины, вызванных энергией тяготения.

В предлагаемых новых представлениях Планковских параметров времени (30), длины (31) и массы (32) исключается двойственность их толкования, вытекающая из четности квадратичных функций $\pm\sqrt{\quad}$ в зависимостях (14)...(16). Таким образом, есть основания полагать, что антивремени, антивдлинны и антимассы в реальной Вселенной не существует, что требует коррекции соответствующих космологических теорий. При этом не исключаются античастицы и созданное на их базе антивещество.

Для подтверждения полученных расчетным путем новых более точных величин гравитационной постоянной G (26), (28), необходима их экспериментальная проверка в будущих прямых измерениях величины G и в расчетах на их базе траекторий движения естественных и искусственных космических объектов (особенно – комет и астероидов, подлетающих к Земле на опасное расстояние, что позволит на более ранних этапах определить возможность или невозможность их столкновения).

Аналогичным образом для подтверждения полученной расчетным путем новой более точной величины постоянной Планка h (29) необходима ее экспериментальная проверка в будущих прямых измерениях. Следует учесть, что для h имеется больше возможностей для экспериментального повышения точности, чем для гравитационной постоянной G .

Возможность аналитического уточнения численного значения гравитационной постоянной G и постоянной Планка h , установление ранее неизвестных объективно существующих закономерностей материального мира – квантовой взаимосвязи частот гравитационного поля Вселенной и частот гравитационного поля Земли и Солнечной системы ν_p , квантовое соотношения основных линейных размеров во Вселенной и длин волн со скоростью света в вакууме, а также новые закономерности для определения Планковского времени, длины и массы доказаны в данной работе и в работах [14, 15] впервые и обеспечивают возможность существенного углубления знаний об основах материального мира, поэтому они могут быть квалифицированы, как научные открытия [16].

Общие выводы по работе.

1. На базе достоверных физических законов впервые строго обоснована новая фундаментальная физическая константа: квантовая частота Настасенко: $\nu_p = 7,4 \text{ с}^{-1}$, которая является точной величиной и характеризует частоту гравитационного поля Вселенной.

2. На базе квантовой частоты ν_p , в рамках строгих физических преобразований были получены новые более простые закономерности для определения Планковских величин длины l_p , времени t_p и массы m_p , которые повышают их точность и исключают двойственность их толкования, вытекающую из четности квадратичных функций $\pm\sqrt{\quad}$ имеющую место в известных ранее зависимостях.

3. Исключение четности функций $\pm\sqrt{}$ в определении Планковских величин длины l_p , времени t_p и массы m_p позволяет полагать, что антивремени, антидлины и антимассы в реальной Вселенной не существует, поэтому требуется коррекция соответствующих космологических теорий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Политехнический словарь / Ред. кол. А. Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. – М. : Сов. энциклопедия, 1989. – С. 134, 382, 486, 638–640.
2. CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants (Электронный ресурс). – Режим доступа : https://physics.nist.gov/cuu/Constants/RevModPhys_80_000633acc.pdf
3. 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).
4. Настасенко В. А. Эталон массы в элементах квантовой физики // *Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века : сб. трудов VII Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе. В 2-х томах. Т.1.* – Донецк : ДонГТУ, 2000. – С. 95–100.
5. Настасенко В. О. Аналіз гранично можливих шаруватих структур // *Фізика і хімія твердого тіла.* – Івано-Франківськ : Прикарп. нац. ун-т, 2006. – Т. 7. № 4. – С. 793–797.
6. Силк Дж. Большой взрыв : Пер. с англ. / Под ред. И. Д. Новикова. – М. : Мир, 1982. – 391 с.
7. Настасенко В. О. Нова модель Всесвіту / В. А. Настасенко // *Всеукраїнський з'їзд «Фізика в Україні» : тези доповідей.* – Одеса : ОНУ, «Астропринт», 2005. – С. 77.
8. Настасенко В. А. Новая модель рождения Вселенной – Украинский ответ Хокингу / В. А. Настасенко // *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції.* – Херсон : ХДМА, 2015. – С. 206–210.
9. Настасенко В. А. Обґрунтування параметрів мінімального кванта простору Всесвіту / В. А. Настасенко // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал.* – Херсон, ХДМА, 2012. – № 1 (6). – С. 285–297.
10. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц / Г. Д. Бурдун. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – С. 173–175.
11. Настасенко В. А. Строгое определение волновых параметров гравитационного поля и объединение гравитационного и электромагнитного полей / В. А. Настасенко // *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції.* – Херсон : ХДМА, 2014. – С. 198–204.
12. Настасенко В. А. Новые основы для строгого определения волновых параметров гравитационного поля и объединение гравитационного и электромагнитного полей / Настасенко В. А. // *Науковий вісник ХДМА : науковий журнал.* – Херсон : ХДМА, 2014. – № 1 (10). – С. 213–222.
13. Физический энциклопедический словарь / Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Воронов-Романов и др. ; под общ. ред. А. М. Прохорова. – М. : Сов. Энциклопедия, 1983. – С. 136.
14. Настасенко В. А. О возможности уточнения значения гравитационной постоянной расчетным путем / В. А. Настасенко // *Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Высокопроизводительные вычислительные системы – 2013».* – К. : НУТУ «КПИ», 2013. – С. 266–272. – Режим доступа : www.HPS-UA-13
15. Настасенко В. А. О возможной периодичности числовых значений фундаментальных физических констант и их уточнении / В. А. Настасенко // *Науковий вісник ХДМА : науковий журнал.* – Херсон : ХДМА, 2014. – № 2 (11). – С. 166–139.
16. Цивільний кодекс України. – К. : Школа, 2003. – С. 142.

REFERENCES

1. Politekhnicheskij slovarj / Red. kol. A. Yu. Ishlinskiyj (gl. red.) i dr. – M. : Sov. ehnciklopediya, 1989. – С. 134, 382, 486, 638–640.
2. CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants (Elektronnijj resurs). – Rezhim dostupu : https://physics.nist.gov/cuu/Constants/RevModPhys_80_000633acc.pdf
3. Phys.Web.Ru >> Postoyannihe | Besprecedentnoe izmerenie gravitacionnoj postoyannoj // Po materialam byulletenya The American Institute of Physics. Bulletin of Physic News. Number 482. May 3 (2000).
4. Nastasenko V. A. Ehtalon massih v ehlementakh kvantovoyj fiziki // Mashinostroenie i tekhnosfera na rubezhe XXI veka : sb. trudov VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. v g. Sevastopole. V 2-kh tomakh. T.1. – Doneck : DonGTU, 2000. – S. 95–100.
5. Nastasenko V. O. Analiz granichno mozhlivikh sharuvatikh struktur // Fizika i khimiya tverdogo tila. – Ivano-Frankivsjk : Prikarp. nac. un-t, 2006. – T. 7. № 4. – С. 793–797.
6. Silk Dzh. Boljshojj vzrihv : Per. s angl. / Pod red. I. D. Novikova. – M. : Mir, 1982. – 391 s.
7. Nastasenko V. O. Nova modelj Vsesvitu / V. A. Nastasenko // Vseukraïnskijj z'ïzd «Fizika v Ukraïni» : tezi dopovideyj. – Odesa : ONU, «Astroprint», 2005. – S. 77.
8. Nastasenko V. A. Novaya modelj rozhdeniya Vselennoj – Ukraïnskijj otvet Khokingu / V. A. Nastasenko // Suchasni informacijni ta innovacijni tekhnologii na transporti : materiali Mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferencii. – Kherson : KhDMA, 2015. – S. 206–210.
9. Nastasenko V. A. Obruntuvannya parametriv minimaljnogo kvanta prostoru Vsesvitu / V. A. Nastasenko // Naukovijj visnik Khersonskojj derzhavnoj morskoï akademii : naukovijj zhurnal. – Kherson, KhDMA, 2012. – № 1 (6). – S. 285–297.
10. Burdun G. D. Spravochnik po Mezhdunarodnoj sisteme edinic / G. D. Burdun. –M. : Izd-vo standartov, 1972. – S. 173–175.
11. Nastasenko V. A. Strogoe opredelenie volnovihkh parametrov gravitacionnogo polya i objhedinenie gravitacionnogo i ehlektromagnitnogo polej / V. A. Nastasenko // Suchasni informacijni ta innovacijni tekhnologii na transporti : materiali Mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferencii. – Kherson : KhDMA, 2014. – S. 198–204.
12. Nastasenko V. A. Novihe osnovih dlya strogogo opredeleniya volnovihkh parametrov gravitacionnogo polya i objhedinenie gravitacionnogo i ehlektromagnitnogo polej / Nastasenko V. A. // Naukovijj visnik KhDMA : naukovijj zhurnal. – Kherson : KhDMA, 2014. – № 1 (10). – S. 213–222.
13. Fizicheskijj ehnciklopedicheskijj slovarj / D. M. Alekseev, A. M. Bonch-Bruevich, A. S. Voronov-Romanov i dr. ; Pod obth. red. A. M. Prokhorova. –M. : Sov. Ehnciklopediya, 1983. – S. 136.
14. Nastasenko V. A. O vozmozhnosti utochneniya znacheniya gravitacionnoj postoyannoj raschetnim putem / V. A. Nastasenko // Materialih Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Vihokoproizvoditeljnihe vihchisliteljnihe sistemih – 2013». – K. : NUTU «KPI», 2013. – S. 266-272. – Rezhim dostupa : www.HPS-UA-13
15. Nastasenko V. A. O vozmozhnoj periodichnosti chislovihkh znachenijj fundamentalnihkh fizicheskikh konstant i ikh utochnenii / V. A. Nastasenko // Naukovijj visnik KhDMA : naukovijj zhurnal. – Kherson : KhDMA, 2014. – № 2 (11). – S. 166–139.
16. Civilnijj kodeks Ukraïni. –K. : Shkola, 2003. – S.142.

Настасенко В. О. НОВЕ ВИРАЖЕННЯ ПЛАНКІВСЬКИХ ВЕЛИЧИН ЧАСУ, ДОВЖИНИ І МАСИ
В роботі проведений аналіз отриманих М. Планком в 1900 р. величин довжини, часу і маси, які утворені на базі 3-х фундаментальних фізичних констант: швидкості с світла у вакуумі, гравітаційної сталої G та кругової сталої Планка \hbar . Показано, що заміна кругової сталої Планка \hbar на загальну сталу Планка h , дозволяє отримати нові значення Планківських величин довжини, часу і маси, які реально пов'язані з параметрами матеріального світу. На цій базі, в рамках

строгих фізичних закономірностей, в гравітаційній сталій G була виділена Планківська частота, яка є частотою гравітаційного поля Всесвіту, що складає основу матеріального світу. Її використання дозволяє спростити визначення Планківських величин довжини, часу і маси і вилучити в них подвійність тлумачення, що витікає з парності квадратичних функцій $\pm\sqrt{}$. Це дозволяє вважати, що античасу, антидовжини й антимаси в реальному Всесвіті не існує, що потребує корекції відповідних космологічних теорій.

Ключові слова: фундаментальні фізичні сталі, Планківські величини довжини, часу і маси.

Nastasenko V. A. NEW PRESENTATION OF PLANCK'S VALUES OF LENGTH, TIME, AND MASS
This paper provides the analysis of the values of length, time, and mass, obtained by M. Planck in 1900 and derived from three fundamental physical constants: the speed of light in vacuum, the gravitational constant G and Planck's circular constant \hbar . It is shown that replacing Planck's circular constant \hbar with common Planck's constant h allows obtaining new values of Planck's length, time and mass that are really related to the parameters of the material world. On this basis, within the framework of strict physical regularities, Planck's frequency was derived from the gravitational constant G , which is the frequency of the gravitational field of the universe, forming the basis of the material world. Its use makes it possible to simplify determination of Planck's values of length, time, and mass and exclude in them the duality of interpretation resulting from the parity of the quadratic functions $\pm\sqrt{}$. This allows us to believe that anti-time, anti-length and anti-mass do not exist in the real universe, which requires correction of the corresponding cosmological theories.

Keywords: fundamental physical constants, Planck's values of length, time, and mass.

© Настасенко В. О.

Статтю прийнято
до редакції 12.04.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Малыгин Б. В., *д.т.н., професор кафедры судовых энергетически установок Херсонской государственной морской академии;*

Касилов О. А., *инженер кафедры общинженерной подготовки Херсонской государственной морской академии*

В качестве материала для исследования выбрали сталь 60С2ХФА, (применяемую для зубил, рубильных молотков), штамповые стали для горячего деформирования, марок 35Х5ВМФС, 55ХГСНМФ, материалы для деталей холодных штампов Х, 9ХС, ДИ-31, а также опытные 7ХСМТ, 65ХЗГСВМФ, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС. Стали обрабатывались холодом для полного распада аустенита в мартенсит. Проводилось исследование вторичной твердости сталей, обладающих этим свойством. Проводились исследования структурно-чувствительных свойств, удельного электросопротивления, намагниченности насыщения, коэрцитивной силы и твердости легированных сталей.

Ключевые слова: *легированная сталь, низкотемпературная термомеханическая обработка, закалка в азоте, коэрцитивная сила, удельное электросопротивление.*

Вступление. В настоящее время для обеспечения высокой прочности и ударной вязкости металлообрабатывающего инструмента, а в частности штамповых ударных сталей предъявляются повышенные требования. Для обеспечения долговечности и износостойкости штампового и рубильного инструмента проведена работа по усовершенствованию материала инструмента. Получен ряд данных характеристик новых марок сталей, содержащих ценные легирующие элементы такие как хром, молибден, кобальт, ванадий, никель. Получен ряд результатов исследования штамповых ударных сталей, таких как σ_b – предел прочности, $\delta\%$ – относительное удлинение, ϕ – относительное сужение, НВ – твердость в МПа, НРС – твердость по Роквеллу, A_n – ударная вязкость в кгс·м/см² и их структура в исходном состоянии.

Для повышения механических свойств материалов нами исследовано влияние ВТМО – высокотемпературной термомеханической обработки с обработкой глубоким холодом на твердость и прочность легированных инструментальных вторично твердеющих сталей.

Актуальность. Исследовать ряд марок сталей штампового рубильного инструмента с различной концентрацией легирующих элементов и показать области применения данных материалов в судостроении, судоремонте, машиностроении.

В статье приведен ряд марок сталей штампового и рубильного инструмента такие как 60С2ХФА, 35Х5ВМФС, 55ХГСНМФ для деталей холодных штампов Х9ХСДИ-31Ш, а также опытные 7ХСМТ, 65ХЗГСВМФ, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС и др. [1]

Целью настоящего исследования является изучение возможности повышения твердости инструментальных штамповых сталей, а также сталей для ударного инструмента (молотовых сталей, сталей рубильных молотков) в результате комбинированной обработки, заключающейся в сочетании высокотемпературной механической обработки (ВТМО) с обработкой глубоким холодом при 196 °С.

Известно, что ВТМО – это сочетание операции нагрева стали выше критических точек, пластической деформации в аустенитном состоянии и резкого охлаждения для получения мартенситной структуры с последующим низким отпуском для снятия напряжения. ВТМО обеспечивает повышение всего комплекса механических свойств стальных изделий – прочности, пластичности и вязкости.

После закалки термомеханически упрочнённой стали в структуре наряду с мартенситом присутствует некоторый процент нераспавшегося (остаточного) аустенита, который снижает твердость тем в большей степени, чем выше его объёмная доля.

Известно также, что обработка холодом закаленных легированных сталей позволяет заметно снизить количество мягкого остаточного аустенита и увеличить долю твердого мартенсита, что вызывает дополнительный прирост твердости закаленных изделий.

Представляло интерес объединить выше названные способы повышения прочности и твердости легированных сталей в единый технологический цикл комбинированную обработку: ВТМО + глубокое охлаждение в жидком азоте [2].

В качестве материала для исследования выбрали сталь 60С2ХФА, применяемую для зубил рубильных молотков, штамповые стали для горячего деформирования марок 35Х5ВМФС, 55ХГСНМФ, для деталей холодных штампов Х, 9ХС, ДИ-31Ш, а также опытные 7ХСМТ, 65Х3ГСВМФ, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС и др.

Стали 60С2ХФА, Х, 9ХС, 7ХСМТ не обладают вторичной твердостью и поэтому обработка холодом для них является единственной операцией для распада остаточного аустенита в мартенсит. Стали 65Х3ГСВМФ, 55Х2ГСВ2М2Ф, 35Х5ВМФС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС склонны или обладают вторичной твердостью, заключающейся в выделении специальных карбидов и превращении части остаточного аустенита в мартенсит при высоком отпуске в интервале температур 500–600 °С.

Для этих сталей обработка холодом не является единственным способом разложения остаточного аустенита – эта же цель может быть достигнута путем многократного (2-х или 3-х кратного) отпуска в интервале 530–550 °С.

Исследовали следующие режимы упрочнения:

- стандартная закалка в масле от оптимальных температур и отпуска в интервале 200–700 °С в течение 2-х часов;
- закалка в азоте – нагрев до оптимальных температур и охлаждение не в масле, а непосредственно в жидком азоте, затем отпуск;
- высокотемпературная термомеханическая обработка по режиму: нагрев заготовок до температур на 50–100 °С выше оптимальных, назначаемых при обычной закалке, горячая деформация свободной ковкой со степенью обжатия на 40–50 %, охлаждение в масле и заключительный отпуск при температурах 200–600 °С;
- комбинированная обработка (ВТМО + обработка холодом) – часть заготовок после (ВТМО) подвергали глубокому охлаждению в жидком азоте, а затем отпуску.

Механические свойства после различных режимов упрочнения оценивали по результатам замера твердости по Роквеллу на приборе ТК-2М (алмазный конус, нагрузка 150 кгс). Электрические свойства стали измеряли на образцах размером 5х5х100 мм с помощью прибора «Мост сопротивления (МОД-1)». Намагниченность насыщения измеряли на образцах размером 10х10х55 мм на баллистической установке БУ-3.

В табл. 1 приведены результаты замеров твердости легированных сталей после стандартной закалки и отпуска в интервале температур 200–700 °С, а также после закалки в жидком азоте. На примере стали 8Х2ГСВМФБ (ДИ-31Ш), закаленной от температуры 900 °С в масле (числитель) и непосредственно в жидком азоте (знаменатель), можно заметить положительное влияние глубокого охлаждения – все образцы имеют повышенную твердость. При закалке этой стали от 1000 °С в структуре наряду с мартенситом присутствует возросшая доля остаточного аустенита, не превращенного в мартенсит из-за снижения мартенситной точки. Твердость при этом заметно снижается и лишь при отпуске 500–600 °С возрастает из-за явления дисперсионного твердения спецкарбидами и из-за распада остаточного аустенита в мартенсит (вторичная твердость) Закалка от 1000 °С в жидком азоте сразу же дает твердость 65,5 HRC, что для инструмента является отличным результатом: последующий отпуск при 200 °С, 400 °С, 500 °С снижает твердость охлажденной в азоте стали, но она остается на достаточно высоком уровне. Для сталей Х(ШХ15), 9ХС, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС и 65Х3ГСВМФ тоже получили приращение твердости в результате глубокого охлаждения в жидком азоте, особенно после заключительного низкого отпуска при температуре 200°С (табл. 1) [3].

Таблица 1 – Изменение твердости легированных инструментальных сталей в зависимости от режима закалки, обработки холодом и температуры отпуска (числитель закалка в масле, знаменатель закалка в азоте)

Температура закалки	Температура отпуска, °С					
	Без отпуска	200	400	500	600	700
Сталь 8Х2ГСВМФБ(ДИ-31Ш)						
1000	55/65,5	–	–	–	–	–
Сталь Х(ШХ15)						
840	64 /66	60/63,5	52/55	42,5/ -	33,5/ -	-
850	Сталь 9ХС					
850	64/66	60/62	57/58	55/ 55	–	–
Сталь 70С2НДКМ						
850	62/65	58/61,5	52/54	45/ 48	–	–
Сталь 140Г2Н2МС						
800	63/65,5	59/63,5	56/60	54/55	45/46	–
Сталь 65Х3ГСВМФ						
1000	64/65,5	59/61	57/58,5	55/57	51/52	–

Для теплостойких штамповых сталей, предназначенных для горячего деформирования сплавов, важно получить повышенную твердость после заключительного высокого отпуска, поэтому теплостойкие стали 55ХГНСМФ, 55ГНСНМ2Ф, 35Х2ГСВ2М2Ф, 35Х5ВМФС, 6Х4М2ФТ и 8Х5М2ФС после закалки в жидком азоте отпускали в интервале температур 500–650 °С. Результаты замеров твердости представлены в табл. 2. Видно, что после закалки твердость находится на весьма высоком уровне для данного класса сталей. Высокий отпуск снижает твердость, но она остается на достаточно высоком уровне, выше твердости нужной для данного класса сталей. Твердость остается выше предъявленных требований для сплавов горячего деформирования (46–50 HRC) [10].

Известно, что удельное электросопротивление (МкОм х см) и намагниченность насыщения (Гс) являются структурно чувствительными физическими свойствами. Поэтому представляло интерес проверить количественные изменения этих характеристик в результате глубокой обработки холодом.

Образцы стали 60С2ХФА подвергали закалке в масле от температуры 850 °С (стандартная температура) и 1080 °С (повышенная с целью получить повышенный процент остаточного аустенита). Для сравнения вторую партию образцов закачивали от этих же температур, но не в масле, а в жидком азоте. Результаты измерений физических свойств иллюстрирует табл. 3. Видно, что намагниченность насыщения увеличивается, а удельное электросопротивление уменьшается в результате глубокого охлаждения до – 196 °С.

Таблица 2 – Твердость инструментальных теплостойких сталей после закалки в жидком азоте и высокого отпуска

Марка стали	Температура закалки, °С	температура отпуска ,С°				
		Без отпуска	500	550	600	650
55ХГНСМФ	1000	54	54	52	48	–
55ХГНСМ2Ф	1000	55	55	54	50	–
55Х2ГСВ2М2Ф	1100	64	58	58	56	52,5
35Х5ВМФС	1100	59	54	55	50,5	40,5
6Х4М2ФТ	1100	64	58,5	61	54,5	–
8Х5М2ФС	1100	64	62,5	64	58	–

Для стали 7ХСМТ и 9ХС эта закономерность проявляется в большей степени, чем для стали 60С2ХФА(табл. 3).

Таблица 3 – Изменение удельного электросопротивления, намагниченности насыщения, коэрцитивной силы и твердости стали 5ХНМ после закалки в масле от 900 °С, (числитель) и высокотемпературной термомеханической обработки (знаменатель)

Температура отпуска	ρ нОм•м	$4\pi IS, Гс$	Нс. Эрст.	Твердость HRC
без.отп.	0,39/-	1990/-	40,2/-	61/61,5
200	0,35/0,36	19090/2020	21,0/21,9	53/54,5
400	0,31/0,32	20810/21220	21,0/21,9	45/45,5
500	0,29/0,31	20810/21220	20,6/19,5	40,5/ 42,5
600	0,26/0,27	2190/19770	20,6/20,3	31/30,5

*Режим ВТМО: аустенитизация при 900 °С, прокатка за один проход с обжатием 40 %, закалка в масле отпуск в интервале температур 200–600 °С, выдержка 2 часа

В табл. 4 приведены результаты замера твердости стали 60С2ХФА после различных – режимов упрочнения. Закалка в масле от температуры 860 °С и отпуск при 200°С являются для этой стали стандартной обработкой (обработка №1), применяемой для зубил рубильных молотков [7].

Закалка в масле от температуры 1000 °С приводит к увеличению в структуре стали остаточного аустенита и снижению твердости (обработка № 2).

Высокотемпературная термомеханическая обработка [7] (аустенитизация) при температуре 1000 °С деформация свободной ковкой с обжатием заготовок на 50 %, закалка в масле и отпуск при 200 °С) способствует измельчению зерна, повышению твердости и прочности стальных изделий (обработка № 3) Закалка в жидком азоте от температур 900 °С (обработка № 4) и 1000 °С (обработка № 5) позволяет получить более высокую твердость по сравнению с обычной закалкой в масле отпуск при 200 °С способствует измельчению зерна, повышению твердости и прочности стальных изделий (обработка № 3). Закалка в жидком азоте от температур 900 °С (обработка № 4) и 1000 °С (обработка № 5) позволяет получить более высокую твердость по сравнению с обычной закалкой в масле (обработка № 1 и № 2).

Таблица 4 – Изменение твердости стали 60С2ХФА после различных видов упрочнения и температуры заключительного отпуска

№ обработки	Вид обработки	Температура отпуска, °С						
		без отпуска	200	300	400	500	600	700
1	закалка 860 °С	60	58	57	54,5	43,5	36	21,5
2	закалка 1000 °С	57	57	56	53	45	40,5	24,5
3	ВТМО + ковка	61	60,5	59,5	57,4	46,5	39	27
4	закалка в азоте 900 °С	64	60,5	58,5	56	50	–	–
5	закалка в азоте 1000 °С	63,5	60	58	55,5	50	44	–
6	ВТМО + обработка в азоте	–	61	60	57	–	–	–

Обработка жидким азотом заготовок, подвергнутых ВТМО, обеспечивает самую высокую твердость для исследуемой стали после заключительного отпуска при 200–300 °С (комбинированная обработка № 6).

Заготовки стали 7ХСМТ, 65Х3ГСВМФ и Х(ШХ15) также подвергали комбинированной обработке: ВТМО + обработка холодом с заключительным отпуском при 200°С.

В результате получен заметный прирост твердости по сравнению со стандартной закалкой и таким же отпуском: для стали 7ХСМТ – 61 HRC (при стандартной закалке – 59 HRC), для стали 65Х3ГСВИФ – 61 HRC (при стандартной закалке – 58 HRC), для стали Х(ШХ15) – 63,5 HRC (при стандартной закалке – 62 HRC).

Выводы. Комбинированная обработка (ВТМО + охлаждение в жидком азоте с последующим низким отпуском) повышает твердость легированных инструментальных сталей, при этом достигается улучшение структурного состояния, такие как измельчение зерна в результате ВТМО и уменьшение количества остаточного аустенита в результате его распада в мартенсит при отрицательных температурах.

Выбор и назначение режимов термической и термомеханической обработки для инструментов деформирующих материал в холодном и горячем состоянии. Определение новых технологических свойств сталей для инструментов, обрабатывающих конструкционные материалы в судостроении и машиностроении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка стали и сплавов / М. Л. Бернштейн. – М. : Metallurgiya, 1968. – 1020 с.
2. Гуляев А. П. Термическая обработка стали / А. П. Гуляев. – М. : Mashgiz, 1960. – 329 с.
3. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посібник для вузів / В. В. Атаманюк. – К. : Кондор, 2006. – 528 с.
4. Лахтин Ю. М. Новые стали и сплавы в машиностроении / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 2006. – 223 с.
5. Паисов И. В. Термическая обработка стали и чугуна / И. В. Паисов. – М. : Metallurgiya, 2008. – 264 с.
6. Гедвилло А. И. Новые конструкционные материалы / А. И. Гедвилло. – Херсон : Издательство ХГУ, 2004. – 181 с.
7. Дальский А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухаркин и др.; под ред. А. М. Дальской. – М. : Технич. книга, 2004. – 512 с.
8. Лахтин Ю. М. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka / Ю. М. Лахтин – М. : Машиностроение, 1983. – 359 с.
9. Полухин П. И. Технология металлов и сварка / П. И. Полухин, Б. В. Гринберг, В. Т. Жадан, С. К. Кантеник, Д. И. Васильев. – М. Высшая школа, 1977. – 464 с.
10. Кудрявцев И. В. Специальные стали и сплавы / И. В. Кудрявцев, Ф. Ф. Химушин. – М. : Машиностроение, 1968. – 446 с.

REFERENCES

1. Bernshteyjn M. L. Termomekhanicheskaya obrabotka stali i splavov / M. L. Bernshteyjn. – M. : Metallurgiya, 1968. – 1020 s.
2. Gulyaev A. P. Termicheskaya obrabotka stali / A. P. Gulyaev. – M. : Mashgiz, 1960. – 329 s.
3. Tekhnologiya konstrukciyjnikh materialiv : navch. posibnik dlya vuziv / V. V. Atamanyuk. – K. : Kondor, 2006. – 528 s.
4. Lakhtin Yu. M. Novihe stali i splaviv v mashinostroenii / Yu. M. Lakhtin, Ya. D. Kogan. – M. : Mashinostroenie, 2006. – 223 s.
5. Paisov I. V. Termicheskaya obrabotka stali i chuguna / I. V. Paisov. – M. : Metallurgiya, 2008. – 264 s.
6. Gedvillo A. I. Novihe konstrukcionnihe materialih / A. I. Gedvillo. – Kherson : Izdatelstvo KhGU, 2004. – 181 s.

7. Daljskiyj A. M. Tekhnologiya konstrukcionnikh materialov / A. M. Daljskiyj, T. M. Barsukova, L. N. Bukharkin i dr.; pod red. A. M. Daljskogoyj. – M. : Tekhnich. kniga, 2004. – 512 s.
8. Lakhtin Yu. M. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka / Yu. M. Lakhtin – M. : Mashinostroenie, 1983. – 359 s.
9. Polukhin P. I. Tekhnologiya metallov i svarka / P. I. Polukhin, B. V. Grinberg, V. T. Zhadan, S. K. Kantenik, D. I. Vasiljev. – M. Vihsshaya shkola, 1977. – 464 s.
10. Kudryavcev I. B. Specialnihe stali i splaviv / I. V. Kudryavcev, F. F. Khimushin. – M. : Mashinostroenie, 1968. – 446 s.

Малигін Б. В., Касілов О. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

В якості матеріалу для дослідження обрали сталь 60С2ХФА, (яка застосовується для зубіл, рубільних молотків), штампів сталі для горячого деформування марок 35Х5ВМФ, 55ХГСНМФ, матеріали для деталей холодних штампів Х, 9ХС, ДИ-31, а також дослідні 7ХСМТ, 65Х3ГСВМФ, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС. Сталі оброблялись холодом для повного розпаду аустеніта в мартеніт. Проведено дослідження вторинної твердості сталей, що володіють цим властивістю. Проводились дослідження структурно-чутливих властивостей, властивостей питомого електроопору, намагніченості насичення, коерцитивної сили та твердості легованих сталей.

Ключові слова: легована сталь, низькотемпературна термомеханічна обробка, закалка в азоті, коерцитивна сила, питомий електроопір.

Malygin B. V., Kasilov O. A. INVESTIGATION OF THERMOMECHANICAL PROCESSING OF TOOL STEEL

As a material for the research we have chosen steel (60C2XFA) (used for chisels, chipping hammers), stamping steels for hot deformation, grades 35X5BMФ, 55XГСНМФ, materials for parts of cold stamping X, 9XC, ДИ-31, and prototypes 7XCMT, 65X3ГСВМФ, 70C2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6X4M2ФТ, 8X5M2ФС. The steels were treated cold to complete decay of austenite to martensite. A study of the secondary hardness of steels having this property was conducted. Structural sensitive properties, the specific electric resistance, the saturation magnetization, the coercive force and hardness of alloy steels have been studied.

Key words: alloy steel, low-temperature thermomechanical treatment, hardening in nitrogen, coercive force, resistivity, saturation magnetization.

© Малигін Б. В., Касілов О. А.

Статтю прийнято
до редакції 23.05.17

УДК: 667.64:678.02

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЕДВЕСТНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЯХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Марасанов В. В., *д.т.н., профессор кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета, e-mail: volodymyr.marasanov@mail.ru;*

Шарко А. А., *магистр Херсонского национального технического университета, e-mail: sharko_artem@ukr.net*

На основе рассмотрения математических моделей кинематических переменных двухатомной ячейки структуры сплошной среды и условий инициирования акустических волн получена система уравнений, позволяющих в акустическом сигнале от развивающегося дефекта выделить отдельно высокочастотную и низкочастотную составляющие. На примере однородной среды, состоящей из атомов Fe и экспериментальных данных рентгеноструктурного анализа доказана правомочность применений уравнений механики сплошной среды к описанию распространения сигналов от развивающихся дефектов. С энергетических представлений выделения энергии при образовании дефектной структуры в материалах под воздействием внешних напряжений предложен механизм генерации сигналов акустической эмиссии. Квантование энергии излучения акустических колебаний доказано на основе рассмотрения спектра характеристического рентгеновского излучения атомов Fe. Высказана и обоснована гипотеза об усилении акустических сигналов в результате взаимодействия упругих волн с электронами и квантовании допустимых колебаний. Сформулировано условие отборов типов колебаний при образовании волн де Бройля. Выполнены расчеты групповой скорости предвестников акустических сигналов при возникновении дефектов в структуре материалов под воздействием внешних нагрузок и возмущений. На основании вычислений удельной энергии связи атомных ядер Fe, дефектов масс и импульса доказан дискретный характер структурных составляющих материала. Расчет частоты и длины волны подтверждает волновой характер предвестников акустических сигналов. Это является основанием существования корпускулярно-волнового дуализма в структуре спектра сигналов акустической эмиссии.

Ключевые слова: акустика, структурные модели, развивающиеся дефекты, континуум, дискретизация, предвестники сигналов.

Постановка проблемы. Актуальность изучения акустических сигналов от развивающихся дефектов объясняется важностью решения вопросов о характеристиках материалов конструкции. Растущий дефект излучает акустический сигнал, по которому он может быть обнаружен дистанционно [1, 2]. По интенсивности актов эмиссии принимается заключение об опасности дефектов. Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации волн напряжений, является в настоящее время наиболее перспективным средством мониторинга ответственных объектов, позволяющим получать информацию о динамике происходящих процессов в реальном масштабе времени. Однако внедрение метода АЭ в практику диагностирования металлических конструкций в процессе их эксплуатации сопряжено с низкой воспроизводимостью результатов измерений. Изучение механизмов возникновения сигналов АЭ и характеристик спектров предвестников развивающихся дефектов является необходимым этапом решения этой проблемы.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что в основу метода АЭ положено теоретическое обоснование возникновения акустических сигналов при изменениях структуры материалов. Обнаруживается двойственный механизм образования сигналов АЭ: дискретная модель структуры развивающихся дефектов [3–5] и непрерывное распространение акустических волн в среде [6–8]. Дискретная модель структуры возникновения предвестников АЭ характеризуется близкодействием составляющих элементов, в то время как среда распространения акустических колебаний характеризует дальноедействие [9,10]. Связь этих представлений составляет одну из основных задач современного материаловедения.

Целью работы является изучение характерных особенностей предвестников возникновения сигналов АЭ.

Изложение основного материала. Упругие волны связаны с материальной средой, т.к. они обусловлены смещениями частиц в веществе под воздействием приложенных нагрузок. При разрыве атомных связей в твердом теле, вызванных перестройкой кристаллической структуры, образованием, перемещением и аннигиляцией единичных дефектов кристаллической решетки, возникают сигналы АЭ. Простейшей моделью динамической среды, инициирующей распространение АЭ сигнала, может служить одномерная цепочка точечных масс, соединенных упругими связями, для которой функция Лагранжа имеет вид [3]:

$$L = \frac{m}{2} \sum_n \dot{u}^2(n, t) - \frac{1}{2} \sum_{nn'} \Phi(n, n') u(n, t) u(n', t) + \sum_n q(n, t) u(n, t), \quad (1)$$

где n, n' – номера взаимодействующих частиц; m – масса частиц в цепочке; $u(n, t)$ – смещение частиц; $q(n, t)$ – внешние силы; $\Phi(n, n')$ – силовые константы, определяющие упругие связи структурных элементов материалов.

Уравнение движения, полученное из (1), в пространственно-временных представлениях, имеет вид:

$$m \ddot{u}(n, t) + \sum_n \Phi(n, n') u(n', t) = q(n, t). \quad (2)$$

Однако, применение уравнений (1) и (2) к описанию среды, инициирующей при изменениях структуры возникновение сигналов АЭ, не позволяет выделять отдельно низкочастотную и высокочастотную части спектра АЭ сигнала. Для этого необходимо рассмотрение на этой основе более сложных моделей структур.

В механике сплошной среды одной из таких моделей является модель Коссера [3], схематически показанная на рис. 1.

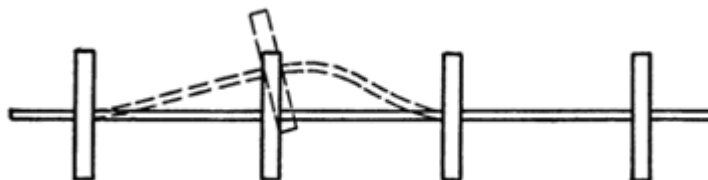


Рисунок 1 – Модель Коссера

Кинематическими переменными в модели Коссера являются не только продольные и поперечные смещения масс в одной плоскости, но и угол поворота масс в той же плоскости.

В настоящей работе сделана попытка перенести эти представления на распространение сигналов АЭ от развивающихся дефектов в средах сложной структуры.

Приближением модели такой дефектной структуры, инициирующей упругие волны, может служить двухатомная ячейка, состоящая из двух частиц разной массы, соединенных упругими связями (рис. 2).

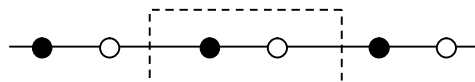


Рисунок 2 – Модель среды сложной структуры

Функция Лагранжа в двухатомной ячейке имеет вид [3]:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{nj} m_j \dot{w}^2(n, j) - \frac{1}{2} \sum_{nn'jj'} \Phi(n - n', j, j') w(n, j) w(n', j') + \sum_{nj} f(n, j) w(n, j). \quad (3)$$

где $w(n, j)$ – смещение j -й частицы в n -й ячейке; $f(n, j)$ – внешняя сила, действующая на частицу; $\Phi(n - n', j, j')$ – силовые константы.

Инвариантность энергии относительно трансляции распространения АЭ сигнала позволяет заменить движение атомов в двухатомной ячейке движением центра масс ячейки.

Введем обозначения:

– $q(n)$ и $\mu(n)$ – обобщенные силы, соответствующие смещению самой ячейки и смещению частиц внутри ячейки;

– $u(n)$ – смещение частиц внутри ячейки;

– $\eta(n)$ – смещение центра масс;

– m_1 и m_2 – массы атомов в ячейке;

– $I = m_1 \xi_1^2 + m_2 \xi_2^2$ – момент инерции ячейки;

– ξ_1 и ξ_2 – координаты частиц в ячейке относительно центра масс.

С учетом этого:

$$u(n) = \frac{1}{m} [m_1 w(n, 1) + m_2 w(n, 2)],$$

$$\eta(n) = \frac{m_1 \xi_1 w(n, 1) + m_2 \xi_2 w(n, 2)}{I}.$$

Тогда уравнения движений ячейки, инициирующей распространение АЭ сигнала, принимают вид:

$$m \ddot{u}(n) + \sum_{n'} \Phi^{00}(n - n') u(n') + \sum_{n'} \Phi^{01}(n - n') \eta(n') = q(n), \quad (4)$$

$$I \ddot{\eta}(n) + \sum_{n'} \Phi^{10}(n - n') u(n') + \sum_{n'} \Phi^{11}(n - n') \eta(n') = \mu(n). \quad (5)$$

Матрица $\Phi^{ss'}(n)(s, s' = 0, 1)$ покоординатно выражается через силовые константы $\Phi(n, j, j')$ предвестников АЭ сигнала:

$$\Phi_{(n)}^{ss'} = \begin{pmatrix} \Phi^{00} & \Phi^{01} \\ \Phi^{10} & \Phi^{11} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $\Phi^{SS'}(n) = \Phi^{S'S}(-n)$; $\sum \Phi^{00}(n) = 0$; $\sum \Phi^{10}(n) = \sum \Phi^{01}(n) = 0$.

В модели (4), (5) величина $u(n)$, характеризующая смещение частиц внутри ячейки, определяет высокочастотную часть спектра акустического сигнала; в то время как смещение центра масс $\eta(n)$ – его низкочастотную составляющую.

При возникновении АЭ сигналов, вызванных образованием структурных дефектов, это проявляется существованием продольных, сдвиговых и спиновых колебаний, а также в количественном перераспределении энергии от предвестников сигналов акустической эмиссии [12, 13].

Главные источники АЭ – это процессы пластической деформации, связанные с появлением, движением и развитием дефектов кристаллической решетки, возникновением и развитием микро- и макротрещин, трением, фазовыми превращениями. Эмиссия проявляется в виде отдельных акустических импульсов. При механических разрушениях, процесс нагружения конструкции происходит значительно медленнее, чем распространение упругого импульса. При этом внутренние напряжения в изделии распределяются неравномерно. В некоторых отдельных областях структуры локальные

напряжения достигают предельного значения. Накопленная энергия выделяется, и определенная ее часть излучается в виде импульса АЭ.

В идеальной кристаллической решетке при малых возмущающих воздействиях $q(n)$ и $\mu(n)$ атомы совершают тепловые колебания в виде белого шума, не зависящего от частоты, энергия которого имеет порядок $4 \cdot 10^{-21}$ Дж [9, 10]. Возмущения в структуре материала проявляются в виде перемещающихся точечных дефектов кристаллической решетки: атомов внедрения или вакансий. Если атом внедрения встречается с вакансией дефекта решетки происходит аннигиляция с выделением энергии порядка 10^{-19} Дж в виде упругого импульса [9, 10].

Более крупные линейные дефекты кристаллической решетки-дислокации развиваются как размещения дополнительной неполной плоскости-краевой дислокации между атомными плоскостями. Она ослабляет прочность кристалла на 2–3 порядка, так как участки с разным количеством плоскостей сдвигаются друг относительно друга при значительно меньших напряжениях, чем на участках, где атомы расположены в узлах решетки. Это смещение представляется как движение дислокации по кристаллу, причем при смещении атомные силы преодолеваются неодновременно.

Энергия, требуемая для образования дислокаций, длиной в одно межатомное расстояние на поверхности равна энергии, необходимой для образования в решетки одного вакантного места. Эта энергия имеет порядок 1эВ [9, 10]. Каждая дислокация окружена полем напряжения. Возникновение упругих колебаний вследствие локального освобождения упругой энергии в процессе пластической деформации и разрушения составляют основу акустической эмиссии.

Выделим в сплошной среде некоторый объем V , ограничивающий участок зарождения акустических сигналов при нарушениях структуры материала. Будем считать разорванными все упругие связи атомов, проходящие через граничные точки этого объема. Тогда уравнение баланса энергии для ячейки материала имеет вид:

$$\dot{T} + \dot{\Phi} + S_+ + S_- = N,$$

где \dot{T} и $\dot{\Phi}$ – скорости изменения кинетической T и потенциальной Φ энергии; N – мощность внешних сил; S_+ и S_- потоки излучаемой энергии, проходящей через границы V в положительном и отрицательном направлениях оси x .

Величины \dot{T} и N являются однозначно определенными во времени в области V т.е.:

$$\dot{T} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho(x) \dot{u}^2(x) dx, \quad N = \int_V q(x) \dot{u}(x) dx.$$

Стягивая область V к точке x , переходим к уравнению баланса энергии в частных производных:

$$\dot{\tau}(x, t) + \dot{\varphi}(x, t) + \frac{\partial S(x, t)}{\partial x} = v(x, t),$$

где τ , φ , v – плотности энергии и мощности; $S(x, t)$ – поток энергии излучения сигнала АЭ.

Поскольку экспериментальное подтверждение модели характеристик предвестников возникновения сигналов АЭ на атомном уровне выполнить невозможно, оценка их свойств может быть произведена посредством обработки данных рентгеноструктурного анализа для атомов железа [14] с учетом современных представлений о строении атомов.

Различие эмиссионных процессов характеристического рентгеновского излучения и акустической эмиссии заключается в том, что эмиссия рентгеновского излучения обуславливается возбуждением внутренних оболочек атома внешними электронами, в то время как АЭ обуславливается структурными изменениями в пространственной решетке.

Механизм возникновения линейчатого спектра характеристического рентгеновского излучения может быть описан на основе электронных конфигураций атомов. Число линий в спектре характеристического рентгеновского излучения определяется количеством электронных слоев атома, содержащих электроны. Кванты, порожденные различными электронами, имеют разные частоты и длины волн. Каждому химическому элементу соответствуют определенный индивидуальный набор длин волн линейчатого рентгеновского спектра.

Спектр характеристического рентгеновского излучения состоит из отдельных спектральных линий. Они состоят из нескольких серий, обозначаемых буквами *K*, *L*, *M*, *N* и *O*. Каждая серия насчитывает небольшое число линий, обозначаемых в порядке убывания длины волны индексами: $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ ($K_\alpha, K_\beta, K_\gamma, \dots, L_\alpha, L_\beta, L_\gamma, \dots$, и т.д.). Спектры разных элементов имеют сходный характер. При увеличении атомного номера элемента *Z* весь рентгеновский спектр смещается в коротковолновую часть не меняя своей структуры.

Спектральные линии, обусловленные переходами электронов в *K*-, *L*-, *M*- оболочки атома, образуют *K*-, *L*-, *M*- серии характеристического спектра. Линии каждой серии обозначаются греческими буквами, с подстрочными индексами, расположенными в порядке убывания интенсивности спектральных линий. Буква *K* обозначает самую коротковолновую линию в спектре. Линии в *K*- серии являются дублетами.

При достаточно большом ускоряющем напряжении между электродами рентгеновской трубки в спектре рентгеновских лучей на фоне непрерывной составляющей появляются спектральные линии в виде узких пиков высокой интенсивности. Расположение спектральных линий на оси длин волн определяется элементарным составом материала анода.

Для атомов железа при напряжении $U = 7,1$ кВ значения длины волны в *K*-серии равны [12] (табл. 1).

Таблица 1 – значения длины волны в *K*-серии

λ , нм			
$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	$K_{\beta 1}$	$K_{\beta 2}$
0,1932	0,1936	0,1753	0,1740

Для образования *K*-серии необходимо создание вакансии в электронном *K*-слое. Пороговое напряжение возбуждения *K*-серии определяется энергией связи электронов этого слоя.

$$eU = E_k.$$

Если $eU > E_k$ возникает вакансия в оболочках второго электронного слоя. Заполнение этих вакансий переходами с более высокоэнергетических слоев с главным квантовым числом $n > 2$ приводит к генерированию *L*-серии (рис. 3).

Символ *K* обозначает рентгеновский фотон, излучаемый при переходе электрона с внешней оболочки на *K* оболочку.

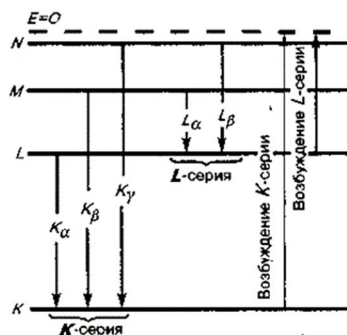


Рисунок 3 – Механизм возникновения рентгеновских серий

Когда электрон переходит с одной оболочки n_1 на другую n_2 , атом излучает рентгеновский фотон с частотой:

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где $R=3.289 \cdot 10^{15}$ 1/с – постоянная Ридберга; Z – порядковый номер элемента; σ – константа, для K -серии $\sigma = 1$, для L -серии $\sigma = 0.75$.

Соответствующая порция энергии может быть сообщена атому за счет удара достаточно быстрым электроном или поглощения рентгеновского фотона.

В основном состоянии атом обладает минимальной энергией. Чтобы перевести атом из основного состояния в возбужденное, необходимо сообщить энергию, например, за счет поглощения атомом фотона. Фотон при поглощении его атомом передает ему всю энергию. Атом не может поглощать только часть фотона, ибо фотон является неделимым. Поэтому атом может поглощать только те фотоны, энергия которых соответствует разности энергии двух его уровней:

$$\nu = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{h}.$$

В [8] была высказана гипотеза об эффекте усиления акустических сигналов в результате взаимодействия упругих волн с электронами. Механизм такого взаимодействия может быть рассмотрен на основе волн де Бройля.

Проявление квантования энергии материальных объектов имеет место в таком процессе как колебания струны, закрепленной на обоих концах. Наличие граничных условий, требующих неподвижности крайних точек струны, приводит к отбору допустимых колебаний, т.е. к их квантованию.

Стоячие волны на круговой орбите могут существовать только при условии, что длина орбиты равна целому числу длин волн. Если это условие не выполняется, то волны, приходящиеся в любую произвольную фиксированную точку пространства после круговых проходов орбиты, не будут совпадать по фазе, т.е. не будут установившимися (рис. 4).

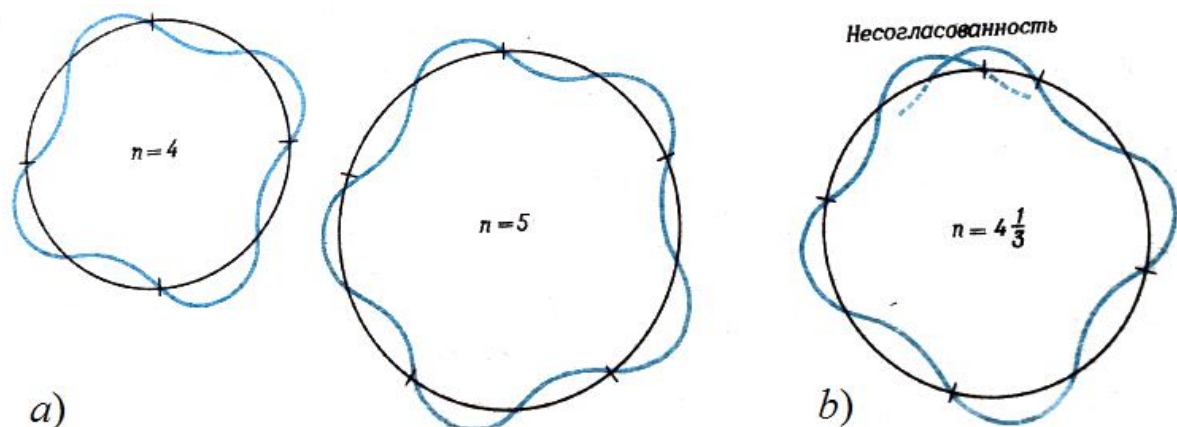


Рисунок 4 – Типы колебаний, определяемые граничными условиями образования волны де Бройля: а) согласованные, б) не согласованные [15]

Для установившихся стоячих волн на круговой орбите ее длина должна быть равна целочисленному значению, кратному от длины волны:

$$2\pi r = n\lambda \Rightarrow n = \frac{2\pi r}{\lambda}.$$

Электроны обладают волновыми свойствами, проявляющимися в существовании волн де Бройля.

Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства микрочастиц, имеют вид:

$$E = h\nu, P = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{mv},$$

где h – постоянная Планка; P – импульс частицы; ν – частота; m – масса микрочастицы; λ – длина волны; v – ее скорость.

Для электрона, ускоренного разностью потенциалов 7.1 кВ, величина λ равна:

$$\frac{mv^2}{2} = eU \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 7100}{9.1 \cdot 10^{-31}}} = 49.9 \cdot 10^6 \text{ м/с},$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \cdot 10^{-34}}{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 49.9 \cdot 10^6} = 0.14 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

В волнах де Бройля существует дисперсия. Фазовая скорость волн де Бройля больше скорости света в вакууме. Это не противоречит теории относительности, т.к. ограничения, накладываемые на движение со скоростью большей скорости света, касаются переноса массы или энергии. Фазовая скорость волны не характеризует ни один из этих процессов, поэтому на ее величину не накладывается никаких ограничений. Она устанавливает только связь между фазами колебаний различных точек пространства. Групповая скорость волн де Бройля равна скорости движения частиц и для атомов железа равна:

$$v_{\text{фаз}} = \frac{c^2}{v} = \frac{(3 \cdot 10^8)^2}{49.9 \cdot 10^6} = 18.03 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Групповая скорость волн де Бройля для атомов Fe равна $49.9 \cdot 10^6$ м/с.

Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства, распространяются на частицы, которые имеют массу покоя, в том числе и на частицы структуры материалов в развивающихся дефектах.

Энергия и тип связи между атомами в решетке определяются строением валентных оболочек. В двухатомной цепочке железа существует ковалентная связь, образуемая путем объединения валентных электронов соседних атомов при перекрытии электронных оболочек. Обобществленные электроны заполняют внешнюю электронную оболочку каждого из взаимодействующих атомов с образованием устойчивой электронной конфигурации. Специфика ковалентной связи в двухатомной цепочке железа состоит в том, что в обобществлении электронов участвуют все атомы кристалла и обобществленные электроны не локализируются, а свободно перемещаются внутри решетки, образуя электронное облако. Распределение электронов в атоме в соответствии со свойствами их волновых функций представляются в виде заряженных облаков, плотность которых максимальна на расстояниях r от ядра. Среднее расстояние электронов от ядра называется радиусом орбитали. Для железа $r = 0.15$ нм.

Формула де Бройля позволяет перенести представления о корпускулярно-волновой природе излучения на частицы вещества. Такой корпускулярно-волновой дуализм должен быть присущ и предвестникам возникновения сигналов АЭ, поскольку существуют корпускулярные характеристики структуры материала, такие как энергия и импульс развивающихся дефектов и волновые характеристики предвестников, такие как частота и длина волны АЭ сигналов. Согласно гипотезе де Бройля с движением любой микрочастицы связано распространение волны, что в применении к возникновению АЭ сигнала связано с высокочастотной составляющей акустического спектра, в то время как низкочастотный спектр АЭ сигнала обусловлен перераспределением колебательной энергии первичного АЭ сигнала.

Для определения прочности межатомных связей в структурных составляющих материала, предшествующих возникновению сигналов АЭ, следует рассмотреть энергию связи атомных ядер, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные частицы (нуклоны). Энергия связи атомных ядер определяется через дефект масс Δm :

$$\Delta E_{св} = \Delta m c^2.$$

Дефект масс – это разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я},$$

где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева; A – массовое число; $m_p = 1.00786$ а.е.м. – масса протона; $m_n = 1.00867$ а.е.м. – масса нейтрона; $m_{я}$ – масса ядра.

Удельная энергия связи выражает собой энергию связи, приходящуюся на один нуклон. Для разных химических элементов эта величина представлена на рис. 5.

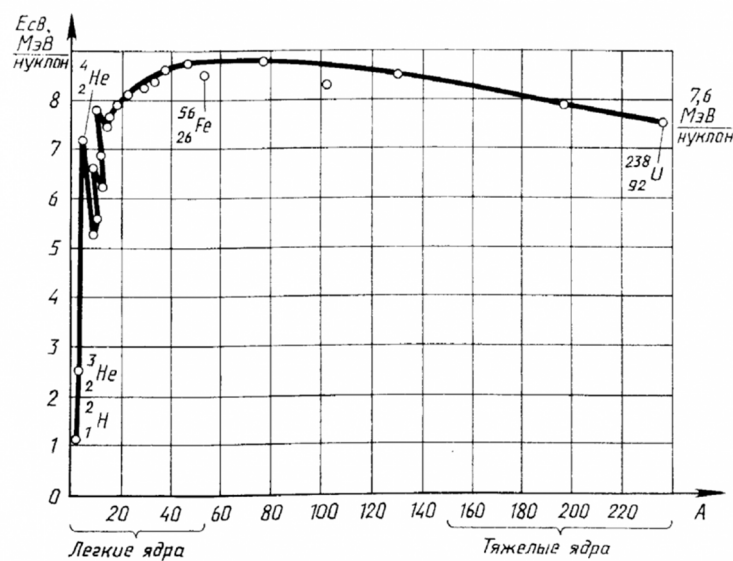


Рисунок 5 – Энергия связи атомных ядер

Вычисления, выполненные в атомных единицах массы для атомов Fe , дали значения $\Delta m = 56 \cdot 1.00786 + (56 - 26) \cdot 1.00867 - 55.9355 = 0.52896$ а.е.м.

С учетом этого энергия связи $E = 931 \text{ МэВ} \cdot 0.52896 \text{ а.е.м.} = 492.461 \text{ МэВ}$.

В свою очередь, удельная энергия связи $E/n = 492.461 / 56 = 8.79396 \text{ МэВ}$ на нуклон.

Перенос расчетных значений удельной энергии связи нуклонов для атомов железа на рис. 5, обнаруживает сходимость расчетов с экспериментальными данными. Это является подтверждением реальной прочности железа.

Выводы. На основе рассмотрения двухатомной ячейки построена модель акустического спектра сигналов развивающихся дефектов, в которой выделены низкочастотная и высокочастотная составляющая АЭ сигнала. Предложен механизм возникновения сигналов АЭ в развивающихся дефектах структуры материала.

На примере однородной среды, состоящей из атомов Fe и экспериментальных данных рентгеноструктурного анализа, доказана правомочность используемых корпускулярных и волновых подходов к описанию среды, инициирующей возникновение сигналов АЭ.

На основе современных представлений о строении атомного ядра атомов Fe выполнены расчеты характеристик среды предвестников АЭ сигнала: дефекта масс, энергии связи, удельной энергии связи, а также акустических параметров моделей АЭ сигналов: длин волн и скоростей волн де Бройля. Выполненные расчеты являются

количественным обоснованием гипотезы о существовании корпускулярно-волнового дуализма сигналов АЭ от развивающихся дефектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марасанов В. В. Математическое обеспечение построения моделей определения координат источников акустической эмиссии / В. В. Марасанов, А. А. Шарко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2016. – № 1 (14). – С. 310–319.
2. Marasanov V. V. Triangulation methods of position defects in acoustic-emission control / V. V. Marasanov, A. A. Sharko // Системні технології. – 2015. – Вип. 6 (101). – С. 85–91.
3. Кунин И. А. Теория упругих сред с микроструктурой. Нелокальная теория упругости / И. А. Кунин. – М. : Наука, 1975. – 410 с.
4. Lymarenko Y. A. Mathematical modeling of acoustic emission process / Y. A. Lymarenko, A. D. Shamprovskij // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – 2003. – No. 1. – P. 30–33.
5. Vinikov V. A. Theoretical models of acoustic emission in rock / V. A. Vinikov, A. S. Voznisenskij, K. B. Ustinov, V. L. Shkuratin // Journal of Applied Mechanics and Theoretical Physics. – 2010. – No. 1. – P. 100–105.
6. Марасанов В. В. Энергетический спектр сигналов акустической эмиссии наноразмерных объектов / В. В. Марасанов, А. А. Шарко // Журнал нано и электронной физики. – 2017. – Т. 9, № 2. – DOI: 10.21272/jnep.9(2).02012. – Режим доступа : https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/65731/1/jnep_V9_02012_4.pdf
7. Лисина С. А. Континуальные и структурно-феноменологические модели в механике сред с микроструктурой : автореф. дис. канд. физ-мат. наук / С. А. Лисина. – Нижний Новгород, 2009. – 56 с.
8. Дельесан Э. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Э. Дельесан, Д. Руайе. – М. : Наука, 1982. – 424 с.
9. Сухорукова В. В. Неразрушающий контроль в 5 кн. : кн. 2. Акустические методы контроля / В. В. Сухорукова. – М. : Высш. школа, 1991. – 283 с.
10. Рудакова А. В. Идентификация опасных состояний механических конструкций методом акустической эмиссии : дисс. канд. техн. наук / А. В. Рудакова. – Херсон, 1997. – 157 с.
11. Марасанов В. В. Наноструктурные модели инициирования сигналов акустической эмиссии / В. В. Марасанов, А. А. Шарко. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2017. – Вип. 57. – С. 115–122.
12. Marasanov V. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signal / V. Marasanov, A. Sharko // International Frontier Science Letters Switzerland. – 2016 – No. 10. – P. 37–44.
13. Емельянов А. Н. Эффективные характеристики в молекулярной теории упругости : дис. канд. физ-мат. наук. / А. Н. Емельянов – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2016 – 156 с.
14. Чубаров В. М. Определение соотношения двух- и трехвалентного железа в карбонатных горных породах по эмиссионным линиям К-серии рентгеновского флуоресцентного спектра / В. М. Чубаров // Аналитика и контроль. – 2011. – Том 15, № 3. – С. 339–343.
15. Дикерсен Р. Основные законы химии / Р. Дикерсен, Г. Грей, Дж. Хейт. – М. : Мир, 1982. – 652 с.

REFERENCES

1. Marasanov V. V. Matematicheskoe obespechenie postroeniya modeley opredeleniya koordinat istochnikov akusticheskoy ehmissii / V. V. Marasanov, A. A. Sharko // Naukoviy visnik Khersonskoy derzhavnoy morskoy akademii. – 2016. – № 1 (14). – S. 310–319.
2. Marasanov V. V. Triangulation methods of position defects in acoustic-emission control / V. V. Marasanov, A. A. Sharko // Sistemni tekhnologi. – 2015. – Vip. 6 (101). – S. 85–91.
3. Kunin I. A. Teoriya uprugikh sred s mikrostrukturoy. Nelokal'naya teoriya uprugosti / I. A. Kunin. – M. : Nauka, 1975. – 410 s.
4. Lymarenko Y. A. Mathematical modeling of acoustic emission process / Y. A. Lymarenko, A. D. Shamprovskiy // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – 2003. – No. 1. – P. 30–33.
5. Vinikov V. A. Theoretical models of acoustic emission in rock / V. A. Vinikov, A. S. Voznisenskij, K. B. Ustinov, V. L. Shkuratin // Journal of Applied Mechanics and Theoretical Physics. – 2010. – No. 1. – P. 100–105.
6. Marasanov V. V. Ehnergeticheskij spektr signalov akusticheskoy ehmissii nanorazmernikh objektov / V. V. Marasanov, A. A. Sharko // Zhurnal nano i ehlektronnoy fiziki. – 2017. – T. 9, № 2. – DOI: 10.21272/jnep.9(2).02012. – Rezhim dostupu : https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/65731/1/jnep_V9_02012_4.pdf
7. Lisina S. A. Kontinualjnihe i strukturno-fenomenologicheskie modeli v mekhanike sred s mikrostrukturoy : avtoref. dis. kand. fiz-mat. nauk / S. A. Lisina. – Nizhniy Novgorod, 2009. – 56 s.
8. Deljesan Eh. Uprugie volnih v tverdikh telakh. Primenenie dlya obrabotki signalov / Eh. Deljesan, D. Ruayje. – M. : Nauka, 1982. – 424 s.
9. Sukhorukova V. V. Nerazrushayuthiy kontrolj v 5 kn. : kn. 2. Akusticheskie metodih kontrolya / V. V. Sukhorukova. – M. : Vihssh. shkola, 1991. – 283 s.
10. Rudakova A. V. Identifikaciya opasnikh sostoyaniy mekhanicheskikh konstrukciy metodom akusticheskoy ehmissii : diss. kand. tekhn. nauk / A. V. Rudakova. – Kherson, 1997. – 157 s.
11. Marasanov V. V. Nanostrukturnihe modeli inicirovaniya signalov akusticheskoy ehmissii / V. V. Marasanov, A. A. Sharko. // Naukovi notatki. Mizhvuzivskiy zbirnik. – Lucjk, 2017. – Vip. 57. – S. 115–122.
12. Marasanov V. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signal / V. Marasanov, A. Sharko // International Frontier Science Letters Switzerland. – 2016 – No. 10. – P. 37–44.
13. Emel'yanov A. N. Ehffektivnihe kharakteristiki v molekulyarnoy teorii uprugosti : dis. kand. fiz-mat. nauk. / A. N. Emel'yanov – Moskva : MGU im. M. V. Lomonosova, 2016 – 156 s.
14. Chubarov V. M. Opredelenie sootnosheniya dvukh- i trekhvalentnogo zheleza v karbonatnikh gornikh porodakh po ehmissionnim liniyam K-serii rentgenovskogo fluorescentnogo spektra / V. M. Chubarov // Analitika i kontrolj. – 2011. – Tom 15, № 3. – S. 339–343.
15. Dikersen R. Osnovnihe zakonih khimii / R. Dikersen, G. Greyj, Dzh. Kheyjt. – M. : Mir, 1982. – 652 s.

Марасанов В. В., Шарко А. О. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЕРЕДВІСНИКІВ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ В СТРУКТУРНИХ МОДЕЛЯХ ТА РОЗВИТКОК ДЕФЕКТІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

На основі розгляду математичних моделей кінематичних змінних двухатомних осередків структури суцільного середовища і умов ініціювання акустичних хвиль отримана система рівнянь, що дозволяє в акустичному сигналі від розвитку дефекту виділити окремо високочастотну і низькочастотну складові. На прикладі однорідного середовища, що складається з атомів Fe, і експериментальних даних рентгеноструктурного аналізу, доведена правомірність застосувань рівнянь механіки суцільного середовища до опису поширення сигналів від розвитку дефектів. З енергетичних уявлень виділення енергії при утворенні дефектної структури в матеріалах під впливом зовнішніх напружень запропоновано механізм генерації сигналів акустичної емісії. Квантування енергії випромінювання акустичних коливань доведено на основі розгляду спектру характеристичного рентгенівського випромінювання атомів Fe. Висловлена і обґрунтована гіпотеза про посилення акустичних сигналів в результаті взаємодії пружних хвиль з електронами і квантуванні допустимих коливань. Сформульовано умову відборів типів коливань при утворенні хвиль де Бройля. Виконано розрахунки групової швидкості провісників акустичних сигналів при виникненні дефектів в структурі матеріалів під впливом зовнішніх навантажень і збурень. На підставі обчислень питомої енергії зв'язку атомних ядер Fe, дефектів мас і імпульсу доведений дискретний характер структурних складових матеріалу. Розрахунок частоти і довжини хвилі підтверджує хвильовий характер провісників акустичних сигналів. Це є підставою існування корпускулярно-хвильового дуалізму в структурі спектра сигналів акустичної емісії.

Ключові слова: акустика, структурні моделі, дефекти, що розвиваються, континуум, дискретизація, провісники сигналів.

Marasanov V. V., Sharko A. A. PHYSICAL PROPERTIES OF SIGNAL PRECURSORS IN STRUCTURAL MODELS OF DEVELOPING DEFECTS OF METAL CONSTRUCTIONS

Based on the consideration of mathematical models of kinematic variables of a diatomic cell of the continuous medium structure and the conditions for initiating acoustic waves, a system of equations is obtained that allows the acoustic signal from the developing defect to separate the high-frequency and low-frequency components. Using the example of a homogeneous medium consisting of Fe atoms and experimental X-ray diffraction data, the validity of the applications of the continuous medium equations to the description of signal propagation from developing defects is proved. From energy representations of energy release in the formation of a defective structure in materials under the influence of external stresses, a mechanism for generating acoustic emission signals is proposed. The quantization of the radiation energy of acoustic vibrations is proved on the basis of a study of the spectrum of the characteristic X-ray radiation of Fe atoms. The hypothesis about amplification of acoustic signals as a result of interaction of elastic waves with electrons and quantization of admissible oscillations is stated and justified. A condition is formulated for selecting the types of oscillations in the formation of de Broglie waves. The group velocities of precursors of acoustic signals are calculated in the event of defects in the structure of materials under the influence of external loads and perturbations. Based on calculations of the specific binding energy of Fe atomic nuclei, mass and momentum defects, the discrete nature of the structural constituents of the material has been proved. Calculation of the frequency and wavelength confirms the wave character of the precursors of acoustic signals. This is the basis for the existence of a particle-wave dualism in the structure of the spectrum of acoustic emission signals.

Key words: acoustics, structural models, developing defects, continuum, discretization, signals precursors.

© Марасанов В. В., Шарко А. О.

Статтю прийнято
до редакції 10.05.17

УДК 629.439

МОДЕЛЬ ТЯГИ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Поляков В. А., к.т.н., с.н.с., старший научный сотрудник Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины (г. Днепр), e-mail: p_v_a_725@mail.ru;

Хачапуридзе Н. М., к.т.н., с.н.с., заместитель директора по научной работе Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины (г. Днепр), e-mail: itst@westa-inter.com.

Тяга магнитолевитирующего поезда (Т МЛП) возникает в процессе электромеханического преобразования энергии его двигателем. Цель настоящего исследования – построение модели такого преобразования. Математическое моделирование – универсальный инструмент анализа и синтеза процессов. Это, тем более актуализует важность выбора конкретной методики исследования. Её выбору и обоснованию в работе уделено особое внимание. Каждая из существующих версий математической модели процесса Т МЛП обладает как преимуществами, так и недостатками. Одним из основных результатов исследования должно стать построение модели указанного процесса, сохраняющей преимущества упомянутых версий, но свободной от их недостатков. Обоснована целесообразность использования для такого построения, комбинированной парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля. Научная новизна исследования состоит в приоритетности создания указанной парадигмы, а также искомой версии модели Т МЛП. Практическая значимость работы, прежде всего, – в возникновении возможности при использовании её результатов, существенного повышения эффективности изучения динамики МЛП, не ведущей к повышению его ресурсоёмкости. Ключевые слова: линейный синхронный двигатель, магнитолевитирующий поезд, математическая модель, комбинированная парадигма исследования, тяга.

Введение. Вследствие ряда их преимуществ, линейные синхронные двигатели (ЛСД) целесообразно использовать для МЛП в качестве тяговых [1, 2]. Имманентное единство процессов, протекающих в таких двигателях, и, в то же время, существенная сложность этих процессов порождает когнитивный дуализм их исследования. Это, в свою очередь, инициирует попытки сепаратного рассмотрения компонентов процесса Т, базовым из которых является электромагнитный. Субкомпоненты последнего компонента порознь небезуспешно исследуемы в рамках парадигм теорий электромагнитного поля и электрических цепей [3–5]. В связи с этим, существующие версии математической модели (ММ) Т МЛП построены [6–8], исходя из автономного использования упомянутых парадигм.

Актуальность исследования. Каждая из упомянутых имеющихся версий модели имеет, по сравнению с иными, преимущества, но и не лишена недостатков. Так, версии модели, базирующиеся на теории поля, мало ресурсоёмки, однако и не вполне адекватны натурно протекающим процессам – в связи с существенными ограничениями, накладываемыми исходными предпосылками их построения. В тоже время, версии модели, основанные на теории цепей, хотя и функциональнее предыдущих, однако также не лишены недостатков. Основным из последних является [9] нестационарность уравнений таких моделей, вызываемая непостоянством значений собственных и взаимных индуктивностей ряда контуров двигателя при изменении положения его муфтера (подвижных частей). Такая нестационарность уравнений версии модели затрудняет её использование, снижая, тем самым, практическую ценность. Ввиду отмеченного, актуальным является построение версии ММ Т МЛП, сохраняющей достоинства версий, исходящих из теорий цепей и поля и, в то же время, свободной от недостатков таких версий.

Постановка задачи. Создание такой ММ Т МЛП является основной задачей настоящей работы.

Методика исследования. Т МЛП возникает при взаимодействии магнитных полей токов индуктора и якоря его ЛСД. Поэтому моделированию подлежат, в первую очередь, эти поля. Магнитная цепь упомянутого двигателя может считаться условно-линейной

подсистемой, поскольку предполагается ненасыщенной [6]. Следовательно, к ней применим принцип аддитивности. Поэтому, в частности, результирующее поле фазы якоря в любой точке геометрического пространства $O\Xi_\chi \forall \chi \in [\overline{1,3}]$, в котором движется муотер относительно статора, определимо как сумма полей, создаваемых в этой точке отдельными катушками такой фазы:

$$B_{\alpha q} = B_{\alpha\kappa q} \cdot e^\kappa; e^\kappa = 1 \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}], q \in [\overline{1, 3}], \quad (1)$$

где n_p – число прямоугольных катушек [10], включённых в каждую из фаз якоря;

$B_{\alpha q}, B_{\alpha\kappa q} \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}]; q \in [\overline{1, 3}]$ – пространственные компоненты индукции поля, создаваемого всей обмоткой фазы α якоря, а также её отдельными катушками в рассматриваемой точке этого пространства.

В свою очередь, величины $B_{\alpha\kappa q} \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}]; q \in [\overline{1, 3}]$ определимы выражениями [11]:

$$B_{\alpha\kappa 1} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[F_{12}(k_1', \varphi', \eta) + F_{12}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 - l}^{\varphi_2 = x_0 - l - d} - \left[F_{12}(k_2', \psi', \eta) + F_{12}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\psi_1 = x_0 + l}^{\psi_2 = x_0 + l + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

$$B_{\alpha\kappa 2} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[F_{12}(k_1, \varphi, \eta) + F_{12}(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 + l}^{\varphi_2 = x_0 + l + d} - \left[F_{12}(k_2, \psi, \eta) + F_{12}(k_3, \psi, \eta) \right]_{\psi_1 = y_0 + a}^{\psi_2 = y_0 + a + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

$$\left\{ F_{12}(k, \varphi, \eta) \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h} = \left\{ \eta \cdot \operatorname{arctg} \frac{k \cdot \varphi - \eta^2}{\eta \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}} - \varphi \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} \frac{k}{\sqrt{2}} \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

$$B_{\alpha\kappa 3} = \frac{i^*}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[f_3^0(k_1, \varphi, \eta) + f_3^0(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\varphi_1 = y_0 - a}^{\varphi_2 = y_0 - a - d} - \left[f_3^0(k_2, \psi, \eta) + f_3^0(k_3, \psi, \eta) \right]_{\psi_1 = y_0 + a}^{\psi_2 = y_0 + a + d} + \right. \\ \left. + \left[f_{31}(k_1', \varphi', \eta) + f_{31}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 - l}^{\varphi_2 = x_0 - l - d} - \left[f_{31}(k_2', \psi', \eta) + f_{31}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\psi_1 = x_0 + l}^{\psi_2 = x_0 + l + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h} \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}];$$

$$f_{31}(k, \varphi, \eta) = -\eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} + \varphi \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + \varphi) \cdot \eta}{\varphi \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}};$$

$$f_{32}(k, \varphi, \eta) = \sqrt{2} \cdot \eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} - k \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + 2 \cdot \varphi) \cdot \eta}{k \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}};$$

$$f_3^0(k, \varphi, \eta) = f_{31}(k, \varphi, \eta) + f_{32}(k, \varphi, \eta);$$

$$k_1' = -k_1 = [(y_0 - a) - (x_0 - l)]; \quad k_2' = -k_2 = [(y_0 + a) - (x_0 + l)];$$

$$k_3' = k_3 = -[(y_0 + a) + (x_0 - l)]; \quad k_4' = k_4 = -[(y_0 - a) + (x_0 + l)], \quad (2)$$

где i^* – плотность тока на единицу площади сечения обмотки катушки; $2 \cdot h, d$ – высота и толщина её обмотки; $2 \cdot l, 2 \cdot a$ – размеры её же внутреннего пространства; x_0, y_0, z_0 – координаты точки пространства, в которой описывается поле.

В выражениях (2), кроме того:

$$i^* = 0,5 \cdot i \cdot w \cdot (h \cdot d)^{(-1)}, \quad (3)$$

где w – число витков катушки.

Далее в (3), вместо i последовательно подставляются значения фазовых токов якоря $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C]$ и, согласно (1) и (2), находятся компоненты $B_{\rho q} \forall \rho \in [A, B, C]$, $q \in [1, 3]$ индукции поля, создаваемого каждым из них.

Пространство системы $O\Xi_\chi \forall \chi \in [1, 3]$ – евклидово. Поэтому мгновенное значение модуля вектора полной индукции поля, создаваемого током ρ -ой фазы якоря, описуемо выражением:

$$B_\rho = \sqrt{B_{\rho q}^{(2)} \cdot e^q}; \quad e^q = 1 \forall \rho \in [A, B, C], q \in [1, 3]. \quad (4)$$

Каждое из значений B_α пропорционально порождающему его i^α , изменяющемуся косинусоидально. Поэтому индукция полного поля якоря в целом изменяется [9] согласно закону:

$$B_{res} = 1,5 \cdot B_{max} \cdot \exp(-j \cdot \psi \cdot t); \quad j^{(2)} = -1, \quad (5)$$

где B_{max}, ψ – амплитуда и частота изменения индукции поля одного из токов $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C]$.

Электродинамика двигателя может быть описана уравнениями второго закона Кирхгофа [12]. Подсистема «контур возбуждения – якорная обмотка», как правило, вырождена [13, 14] – ёмкостные показатели её элементов пренебрежимо низки. Потому в инерциальной системе отсчёта $Q_i^v \forall v \in [A, B, C, M]$ указанным уравнениям может быть придан вид [12]:

$$u_\rho = L_\rho \cdot \frac{d}{dt} i^\rho + L_{\rho\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^\mu + r_\rho \cdot i^\rho \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M], \quad (6)$$

где $u_\rho, L_\rho, L_{\rho\mu}, r_\rho \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M]$ – электродвижущие силы (э. д. с.) источников, собственные и взаимные индуктивности, а также омические сопротивления элементов описываемой парциальной подсистемы; $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]$ – токи в контурах якоря и возбуждения; A, B, C, M – индексы, соответствующие этим контурам; t – текущее время.

Поскольку муfter ЛСД движется относительно его статора, то многие из величин $L_{\rho\mu} \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M]$ имеют переменные во времени значения. Это, в свою очередь, приводит к нестационарности коэффициентов уравнений (6) и, как отмечено, существенно снижает практическую ценность версии модели. С целью устранения указанного недостатка, Т МЛП следует рассматривать относительно координатной системы, в которой обмотки двигателя условно взаимно неподвижны. В таком качестве удобнее всего принять [9] отсчётную систему $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [1, 3]$, жёстко связанную с α -м контуром обмотки возбуждения двигателя. Инерциальной $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [1, 3]$, в общем случае, не является. В то же время, весьма желательно [15], чтобы уравнения, описывающие динамику электрической подсистемы ЛСД в координатах $\eta^\lambda \forall \lambda \in [1, 3]$, имели тензорный характер. Такие уравнения могут быть получены [16] из равенств типа (6), путём замены в них локальных производных $\frac{d}{dt}$ абсолютными $\frac{D}{dt}$, а также перехода в этих равенствах к

координатам $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$. По отношению к произвольному вектору η^β , соотношение между упомянутыми производными, как известно, имеет вид [16]:

$$\frac{D}{dt}\eta^\beta = \frac{d}{dt}\eta^\beta + e_{\beta\kappa\nu} \cdot \omega_\kappa \cdot \eta^\nu, \quad (7)$$

где $e_{\beta\kappa\nu}$, ω_κ – символ Леви-Чивита, а также вектор угловой скорости вращения $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$.

После осуществления указанной замены производных, соотношения, полученные из (6), приобретают тензорный характер. Поэтому, в частности, их форма становится инвариантной по отношению к координатам, в которых они записаны. Переход же к координатам $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ выполняется согласно выражениям:

$$\eta^\lambda = \mathcal{G}_\rho^\lambda \cdot i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}], \quad (8)$$

где \mathcal{G}_ρ^λ – матрица преобразования координат:

$$\mathcal{G}_\rho^\lambda = \frac{\partial \eta^\lambda}{\partial i^\rho} \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]. \quad (9)$$

В свою очередь, выражения для связей вида:

$$\eta^\lambda = \eta^\lambda(i^\rho) \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}] \quad (10)$$

могут быть получены исходя из того, что [9], в процессе описываемого координатного преобразования, одним из его инвариантов являются, в частности, амплитудные значения токов, протекающих в рассматриваемых контурах.

С помощью же матрицы:

$$\mathcal{G}_\lambda^\rho = \frac{\partial i^\rho}{\partial \eta^\lambda} = (\mathcal{G}_\rho^\lambda)^T \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}], \quad (11)$$

осуществимо обратное преобразование:

$$i^\rho = \mathcal{G}_\lambda^\rho \cdot \eta^\lambda \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]. \quad (12)$$

После описанных преобразований уравнения (6) приобретают вид:

$$u_\lambda = L_\lambda \cdot \left(\frac{d}{dt}\eta^\lambda + e_{\lambda\alpha\nu} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\nu \right) + L_{\lambda\zeta} \cdot \left(\frac{d}{dt}\eta^\zeta + e_{\zeta\alpha\sigma} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\sigma \right) + r_\lambda \cdot \eta^\lambda \forall \lambda, \nu, \zeta, \sigma \in [\overline{1,3}]. \quad (13)$$

Таким образом, уравнения (13) имеют постоянные коэффициенты, являются тензорными и описывают электродинамику ЛСД в координатах $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$. После их (как правило – численного) разрешения относительно переменных $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$, последние, с использованием соотношений (12), могут быть преобразованы в координаты $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]$, значения которых определяют реальные токи в контурах двигателя.

В качестве паттерна искомой ММ Т МЛП целесообразно принять элементарный акт взаимодействия поля тока возбуждения ЛСД с полем его якоря. Такое взаимодействие может быть описано выражением закона Ампера [12]:

$$f_{\lambda\chi} = I_{\lambda\chi} \cdot i^\lambda \cdot B_{\lambda\chi} \cdot \text{Sin } \alpha_{\lambda\chi}, \quad (14)$$

где $f_{\lambda\chi}$ – сила взаимодействия полей, создаваемых токами, текущими в цепях χ -го прямолинейного элемента λ -го контура индуктора двигателя и его якоря; $l_{\lambda\chi}, i^{\lambda}, B_{\lambda\chi}, \alpha_{\lambda\chi}$ – длина упомянутого элемента, ток в нём, индукция (условно однородного – в пределах элемента) магнитного поля, в котором элемент находится, а также угол между \vec{i}^{λ} и $\vec{B}_{\lambda\chi}$.

Расчётные схемы обмоток возбуждения и якоря двигателя приняты, соответственно, в виде набора гальванически не связанных токопроводящих прямоугольных рамок, соответствующих контурам криомодулей, и трёхфазной электрической сети, каждой фазе которой соответствует отдельный контур. Тогда, в произвольный момент времени, тяга двигателя определима как векторная сумма величин $\vec{f}_{\lambda\chi} \forall \lambda \in [1, N], \chi \in [1, 4]$, каждая из которых, – это результат взаимодействия поля тока в одном из упомянутых прямолинейных элементов контуров возбуждения с полем, создаваемым токами якорной обмотки. В последнем выражении N – число контуров возбуждения двигателя.

Результат исследования, верифицирующий его корректность. На основании построенной ММ Т МЛП была разработана соответствующая компьютерная модель (КМ). В качестве примера результатов функционирования этой КМ на рис. 1 приведена полученная осциллограмма Т МЛП в режиме его разгона.

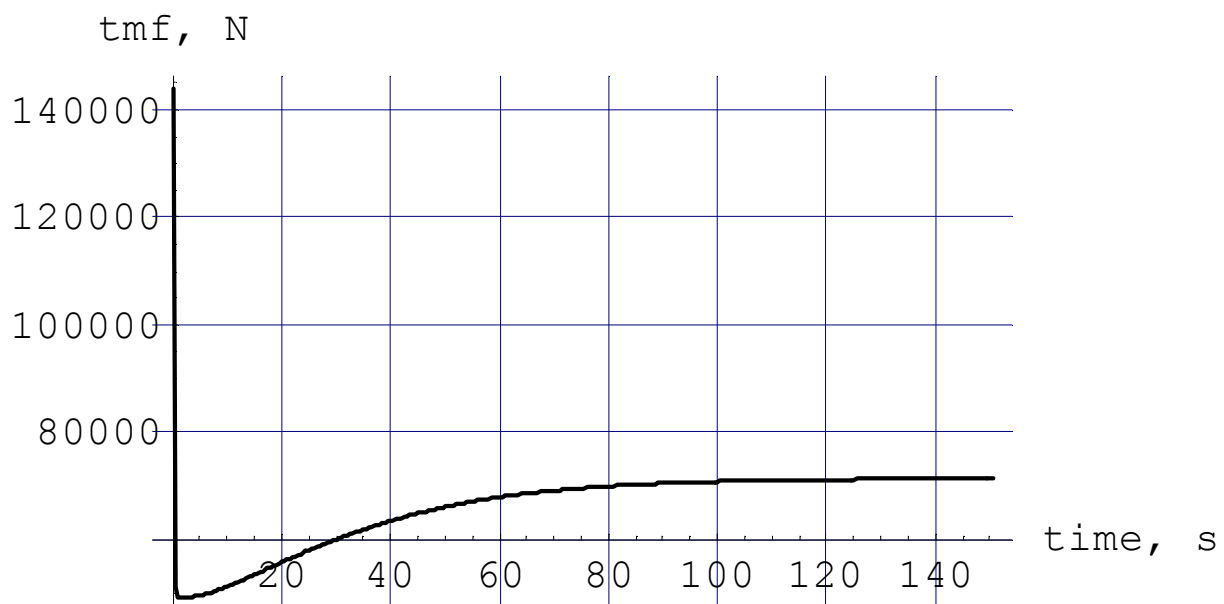


Рисунок 1 – Осциллограмма тяги МЛП

Научная новизна и практическая значимость исследования. Научная новизна исследования усматривается в приоритетности создания комбинированной парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля, а также соответствующей версии математической и компьютерной моделей Т МЛП.

Практическая значимость работы состоит, очевидно, в возникновении возможности при использовании её результатов, существенного повышения эффективности исследования динамики МЛП, не ведущей к повышению ресурсоёмкости такого исследования.

Выводы. Создана комбинированная парадигма построения ММ Т МЛП, ассимилирующая достоинства теорий цепей и поля и, в то же время, свободная от их

недостатков. В рамках этой парадигмы, построены ММ и КМ Т МЛП. Приведён иллюстративный пример их использования, анализ результатов которого свидетельствует о работоспособности созданных парадигмы и версии модели, а поэтому – об их пригодности после верификации и необходимой адаптации к нуждам конкретных практических задач для использования в процессе исследований динамики МЛП. Этим исчерпывающе решена задача настоящей части исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azukizava T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation // IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems. – 1983. – V. Pas-102, № 10. – P. 3306–3314.
2. Fujiwara S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics // SAE Technical Paper Series. – 1995. – SAE 95-1922. – P. 1–6.
3. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек – Л. : Энергия, 1984. – 832 с.
4. Lakhavani S. T., Davson G. E. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications // 34th Vehicular Technol. Conf. – Pittsburg, 1984. – P. 220–225.
5. Matsuoka K. Multi-phase current-fed inverter-driven linear motor and its application to the guided ground transportation system // The Proc. IPEC. – Tokyo, 1990. – V. 1. – P. 604–611.
6. Поляков В. А. Динамика тяговой электромагнитной подсистемы магнитолевитирующего поезда / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» – X., 2012. – № 1015, Вип. 19. – С. 268–273.
7. Поляков В. А. Динамика тяговой подсистемы магнитолевитирующего поезда (полевая парадигма исследования) / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 1 (8). – С. 258–266.
8. Wang, Xudong, Yuan, Shiyang, Wang, Zhaoan Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media // Transacti. of China Electrotechn. Soc. – 2006. – Vol. 21, No.6. – pp. 59–64.
9. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. А. Хорьков – М. : Высш. шк., 1987. – 287 с.
10. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев – К. : Наук. думка, 2001. – 479 с.
11. Бирюков В. А. Магнитное поле прямоугольной катушки с током / В. А. Бирюков, В. А. Данилов // Журнал технической физики. – 1961. – Т. XXXI, № 4. – С. 428–435.
12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л. А. Бессонов – М. : Высш. шк., 1996. – 578 с.
13. Львович А. Ю. Электромеханические системы / А. Ю. Львович – Л. : Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.
14. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
15. Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике / Г. Крон – М., Л. : Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
16. Рашевский П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский – М. : Наука, 1967. – 644 с.

REFERENCES

1. Azukizava T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation // IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems. – 1983. – V. Pas-102, № 10. – P. 3306–3314.
2. Fujiwara S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics // SAE Technical Paper Series. – 1995. – SAE 95-1922. – P. 1–6.
3. Voljdek A. I. Ehlektricheskie mashin / A. I. Voljdek – L. : Ehnergiya, 1984. – 832 s.
4. Lakhavani S. T., Davson G. E. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications // 34th Vehicular Technol. Conf. – Pittsburg, 1984. – P. 220–225.
5. Matsuoka K. Multi-phase current-fed inverter-driven linear motor and its application to the guided ground transportation system // The Proc. IPEC. – Tokyo, 1990. – V. 1. – P. 604–611.
6. Polyakov V. A. Dinamika tyagovoyj ehlektromagnitnoj podsystemih magnitolevitiruyuthego poezda / V. A. Polyakov, N. M. Khachapuridze // Visnik Kharkivskogo nacionaljnogo universitetu imeni V. N. Karazina. Seriya «Matematichne modelyuvannya. Informacijni tekhnologii. Avtomatizovani sistemi upravlinnya» – Kh., 2012. – № 1015, Vip. 19. – S. 268–273.
7. Polyakov V. A. Dinamika tyagovoyj podsystemih magnitolevitiruyuthego poezda (polevaya paradigma issledovaniya) / V. A. Polyakov, N. M. Khachapuridze // Naukoviy visnik Khersonskoj derzhavnoj morskoj akademij. – 2013. – № 1 (8). – S. 258–266.
8. Wang, Xudong, Yuan, Shiyang, Wang, Zhaoan Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media // Transacti. of China Electrotechn. Soc. – 2006. – Vol. 21, No.6. – pp. 59–64.
9. Ehlektricheskie mashin (spetsialnij kurs) / G. A. Sipajlov, E. V. Kononenko, K. A. Khorjgov – M. : Vihssh. shk., 1987. – 287 s.
10. Vihsokoskorostnoj magnitnij transport s ehlektrodinamicheskoyj levitaciej / V. A. Dzenzerskiyj, V. I. Omeljyanenko, S. V. Vasiljev, V. I. Matin, S. A. Sergeev – K. : Nauk. dumka, 2001. – 479 s.
11. Biryukov V. A. Magnitnoe pole pryamougolnoj katushki s tokom / V. A. Biryukov, V. A. Danilov // Zhurnal tekhnicheskoyj fiziki. – 1961. – T. XXXI, № 4. – S. 428–435.
12. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovih ehlektrotekhniki: Ehlektricheskie cepi / L. A. Bessonov – M. : Vihssh. shk., 1996. – 578 s.
13. Ljvovich A. Yu. Ehlektromekhanicheskie sistemih / A. Yu. Ljvovich – L. : Izd-vo LGU, 1989. – 296 s.
14. Kopihlov I. P. Matematicheskoe modelirovanie ehlektricheskikh mashin / I. P. Kopihlov. – M. : Vihssh. shk., 2001. – 327 s.
15. Kron G. Primenenie tenzornogo analiza v ehlektrotekhnike / G. Kron – M., L. : Gosehnergoizdat, 1955. – 275 s.
16. Rashevskiy P. K. Rimanova geometriya i tenzornij analiz / P. K. Rashevskiy. – M. : Nauka, 1967. – 644 s.

Поляков В. О., Хачапуридзе М. М. МОДЕЛЬ ТЯГИ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Тяга магнітолевітуючого поїзда (Т МЛП) виникає в процесі електромеханічного перетворення енергії його двигуном. Ціль цього дослідження – побудова моделі такого перетворення. Математичне моделювання – універсальний інструмент аналізу і синтезу процесів. Це, тим більше, робить актуальною важливість вибору конкретної методики дослідження. Її вибору і обґрунтуванню в роботі приділена особлива увага. Кожна з існуючих версій математичної моделі процесу Т МЛП має як переваги, так і недоліки. Одним з основних результатів дослідження повинна бути побудова моделі зазначеного процесу, яка б зберігала переваги згаданих версій, але була б вільною від їхніх недоліків. Обґрунтовано доцільність використання для такої побудови комбінованої парадигми, що асимілює переваги теорій електричних ланцюгів і магнітного поля.

Наукова новизна дослідження складається в пріоритетності створення зазначеної парадигми, а також шуканої версії моделі Т МЛП. Практична значимість роботи, насамперед, – у виникненні можливості при використанні її результатів істотного підвищення ефективності вивчення динаміки МЛП, яка не веде до підвищення його ресурсоемності.

Ключові слова: лінійний синхронний двигун, магнітолевітуючий поїзд, математична модель, комбінована парадигма дослідження, тяга.

Polyakov V. A., Kachapuridze N. M. MODEL OF MAGLEV TRAIN'S TRACTION

*Magnitolevitutive train traction (MT T) arises in a process of electromechanical energy conversion by its motor. Model building of such transformation is a **purpose of this study**. Mathematical modeling is a universal tool of analysis and synthesis of processes. This makes the importance of choosing the concrete **research methods**. Particular attention in work is paid to selection and justification of such methods. Each of the existing versions of MT T mathematical model has both advantages and disadvantages. One of the **main results** should be the model building of this process, which retains the advantages of its previous versions, but is free from their disadvantages. The expediency of use for such a construction, the combination paradigm, which assimilates the advantages of the theories of electric circuit and magnetic field, was grounded. **Scientific novelty of research** is grounded in the priority of combined research paradigm and MT T model creation. The **practical significance of the work**, if its results are used, first and foremost is in possible significant increase of the efficiency of MT dynamics studying without increase of resources, which are necessary for its carrying out.*

Keywords: linear synchronous motor, Magnitolevitutive train, mathematical model, combined research paradigm, traction.

© Поляков В. О., Хачапуридзе М. М.

Статтю прийнято
до редакції 17.12.16

УДК 621.825

УТОЧНЕННЯ ПІДХОДУ ДО РОЗРАХУНКУ ЗАТИСКНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МУФТ З КАНАТНИМИ ЛАНКАМИ РОЗТЯГУ

Проценко В. О., к.т.н., доц., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: eseu@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3468-4952;

Клементьєва О. Ю., аспірантка кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: vesnyk_ksma@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9592-6214

В статті, завдяки виконанню теоретичних досліджень показана недосконалість існуючого підходу до розрахунку затискних елементів муфт з канатними ланками розтягу. В результаті виконання теоретичних досліджень показано вплив механіки затиску сталевих канатів затискних елементів типу «палець – втулка – поперечний канат», передачу навантаження та міцність затискних елементів. Доведено, що при контрольованому зтягуванні пальці затискних елементів необхідно встановлювати в отвори фланців напівмуфт з мінімальним зазором для уникнення їх зсуву силою натягу канатів в межах зазору в цьому сполученні. Розглянуто процес передачі робочого навантаження від втулок до фланців напівмуфт. При цьому з умови нерозкриття стику отримано вираз для обчислення потрібного коефіцієнту запасу опору екстракції канату в залежності від розмірів деталей затискних елементів, а також для обчислення осьового зусилля зтягування пальця та зусилля, на яке необхідно розраховувати пальці на зріз. З огляду на отримані результати, запропонований та апробований алгоритм проектування муфт з торцевими канатами.

Ключові слова: затискний елемент, гальмо, канатні ланки, структура, синтез.

Вступ. Зменшення запасів міцності деталей машин та, відповідно, зниження споживання конструкційних матеріалів можливе за рахунок уточнення розподілу навантаження між цими деталями та визначення напружень. Це є актуальною задачею для сучасного машинобудування та особливо важливо для нових пристроїв, розроблення та впровадження яких знаходиться на початковому етапі.

Постановка задачі. Авторами розроблені та досліджуються ряд конструкцій сполучних муфт з канатними ланками у постійному та запобіжному виконанні [1, 2]. Одними із основних елементів таких муфт є затискні елементи. Першими були розроблені затискні елементи в яких канати затискаються в поперечних отворах чи пазах пари «втулка-палець» за рахунок переміщення тим чи іншим чином однієї з деталей цієї пари.

У попередніх дослідженнях [3] розроблена розрахункова модель для оцінки міцності пальця затискного елемента для нерухомого закріплення канату відносно фланця напівмуфти за рахунок переміщення пальця гайкою відносно втулки, встановленої з упором у фланець напівмуфти (рис. 1). Такий затискний елемент надалі називатимемо «палець-втулка-поперечний канат».

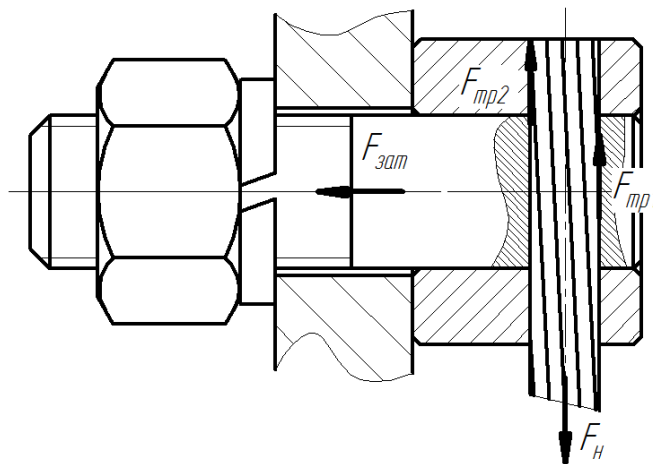


Рисунок 1 – Схема до визначення силових факторів згідно з базовою розрахунковою моделлю

У цій моделі реалізований підхід до визначення параметрів затискних елементів за рахунок наступних прийнятих припущень (рис. 1):

- канат у затискному елементі закріплений силами тертя F_{mp1} та F_{mp2} між поверхнями канату, втулки та пальця, що врівноважують силу натягу канатів F_H ;
- сили тертя F_{mp1} та F_{mp2} викликає сила затиску канату пальцем $F_{зат}$;
- силу натягу канатів F_H повністю сприймає палець, ця сила викликає в його тілі напруження згину $\sigma_{зз}$;
- сила затиску $F_{зат}$ викликає в тілі пальця напруження розтягу σ_p .

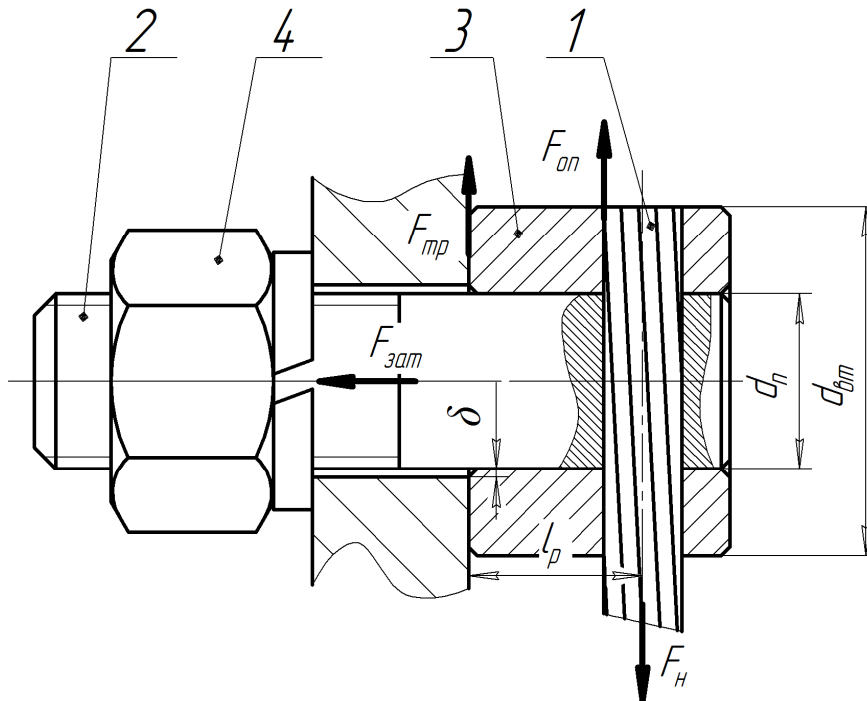


Рисунок 2 – Схема до визначення силових факторів згідно з новою розрахунковою моделлю

Наведений підхід до розрахунку пальця затискного елемента не враховують наступні чинники:

- деформування канату в місці його закріплення поперечними отворами та ймовірне зменшення при цьому потрібного зусилля затиску за рахунок контактного зчеплення пальця з відповідними поверхнями втулки та пальця;
- палець в такому сполученні частково розвантажений силою тертя в стику «втулка-фланець напівмуфти»;
- палець розвантажений від згину упором втулки у фланець напівмуфти;
- розрахунок на міцність не враховує скручування стрижня пальця моментом тертя в нарізевому сполученні «палець-гайка».

Тому урахування останніх чинників та удосконалення розрахункової моделі пальців затискних елементів канатних муфт є **метою** даної роботи.

Виклад основного матеріалу. Дослідженнями [4] встановлено, зокрема, що основний вплив на формування сили затиску канату затискним елементом типу «палець – втулка – поперечний канат» мають сили пружної та пластичної взаємодії каната та затискних елементів, а не сили тертя, оскільки зведений коефіцієнт опору вириванню канату із затискного елемента не менше ніж на порядок перевищує коефіцієнт тертя «сталь по сталі» за наявності мащення (коефіцієнт дійсного опору екстракції канату $\kappa_{оп} = 1,0$ проти коефіцієнта тертя ковзання у стиках «канат – поверхні затискних елементів» $f = 0,08...0,10$). З огляду на викладене, наведемо уточнену розрахункову схему

затискного елемента розглянутого типу та позначимо силові фактори, що діють у такому з'єднанні.

Для закріплення канату 1 та передачі ним навантаження сили натягу канату F_H повинна врівноважуватись силою опору F_{on} його екстракції з отворів чи пазів пальця 2 та втулки 3. Сила опору F_{on} повинна прикликатися зтягуванням пальця 2 силою зтягування $F_{зам}$ за рахунок закручування гайки 4. Сила зтягування $F_{зам}$ викликає також силу тертя F_{mp} в стику втулки 3 та фланця напівмуфти 4.

Наведені викладки можна записати у вигляді наступних рівнянь:

$$F_{on} \geq F_H. \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_{on} = \kappa_{on} \times F_{зам} \\ \kappa_{on} = 1,0 \end{cases}, \quad (2)$$

звідки

$$F_{зам} \geq F_H. \quad (3)$$

$$F_{mp} = f \times F_{зам}. \quad (4)$$

У випадку, коли палець 2 встановлений у отвір фланця із зазором, то від зсуву його разом із втулкою 3 в межах цього зазору убезпечує сила тертя F_{mp} , тобто умова відсутності зсуву матиме вигляд (5):

$$F_{mp} \geq F_H. \quad (5)$$

Далі розглядатимемо випадок складання муфти при контрольованому зтягуванні затискних елементів.

В цьому варіанті навіть якщо виконувати зтягування із запасом $\kappa_{зон}$:

$$F_{зам} = \kappa_{зон} \times \kappa_{on} \times F_H. \quad (6)$$

При контрольованому зтягуванні, наприклад, при коефіцієнті запасу опору екстракції канату $\kappa_{зон} = 4,0$, потрібне зусилля затиску пальця становить $F_{зам} = 4F_H$, а сила тертя навіть у випадку відсутності мастила на поверхнях торця втулки та фланця напівмуфти (коефіцієнт тертя $f = 0,15$) складе $F_{mp} = 2f \times F_{зам} = 0,8F_H$ (з урахуванням ковзання у двох стиках фланця напівмуфти із втулкою та гайкою (шайбою)). Це означає, що умова (5) виконана не буде, і палець разом зі втулкою буде переміщуватися під дією сили натягу канату, вибираючи зазор δ (рис. 2). З наведених фактів можна зробити практично важливий висновок про те, що палець при передбаченому його контрольованому зтягуванні необхідно ставити в отвір фланця напівмуфти без зазору ($\delta = 0$) або з мінімальним зазором та, відповідно, розраховувати його на зріз за відомими формулами [5]. Розвантажити палець від зсуву та зрізу можна, наприклад, постановкою штифтів між втулкою та фланцем напівмуфти, але такий захід можна реалізувати у випадку достатніх розмірів деталей затискних елементів, зокрема товщини стінки втулок.

Умова відсутності розкриття стику «торець втулки – торець фланця напівмуфти» виражається наявністю в стику напружень σ_{min} від зтягування силою $F_{зам}$ та перекидання силою F_H :

$$\sigma_{min} = (\sigma_{зам} - \sigma_M) > 0, \quad (7)$$

де $\sigma_{зам}$ – напруження в стику від зтягування силою $F_{зам}$; σ_M – напруження в стику від дії перекидного моменту M_H сили натягу F_H ($M_H = F_H \times l_p$).

$$\sigma_{зам} = \frac{4F_{зам}}{\pi(d_{эм}^2 - d_n^2)}. \quad (8)$$

$$\sigma_M = \frac{32d_{эм} \times F_H l_p}{\pi(d_{эм}^4 - d_n^4)}. \quad (9)$$

З рівнянь (8) – (10) маємо:

$$\frac{4F_{зам}}{\pi(d_{эм}^2 - d_n^2)} \succ \frac{32d_{эм} \times F_H l_p}{\pi(d_{эм}^4 - d_n^4)}, \quad (10)$$

звідки:

$$F_{зам} \succ \frac{8d_{эм} F_H l_p}{(d_{эм}^2 + d_n^2)}, \quad (11)$$

Якщо в рівняння (11) підставити (6), то після перетворень отримаємо вираз для обчислення потрібного коефіцієнту запасу опору екстракції канату $\kappa_{зон}$ при відомих, наприклад з компоновочного креслення, розмірах муфти:

$$\kappa_{зон} \succ \frac{8d_{эм} l_p}{(d_{эм}^2 + d_n^2)}. \quad (12)$$

Наприклад, при $d_{эм} = 2d_n$, отримаємо:

$$\kappa_{зон} \succ \frac{16l_p}{5d_n}. \quad (13)$$

З урахуванням тертя в стику «торець втулки – торець фланця напівмуфти» сила, що зрізатиме палець, може бути обчислена за формулою:

$$F_{зр} = F_H - F_{mp} = F_H - f \times \kappa_{зон} \times \kappa_{он} \times F_H = F_H (1 - f \times \kappa_{зон} \times \kappa_{он}). \quad (14)$$

Або при наявності мастила на поверхнях стику ($\kappa_{он} = 1,0$):

$$F_{зр} = F_H (1 - f\kappa_{зон}). \quad (15)$$

Отримані результати формують умови для пропозиції наступного алгоритму розрахунку та проектування муфт з торцевою установкою канатів, оснащених затискними елементами, що розглянуті в даній роботі:

1. Визначити основні розміри муфти, зокрема діаметри розташування затискних елементів D та кількість канатів z , момент муфти T .
2. Розрахувати робочий натяг канатів F_H за формулами [3, 8] в залежності від їх розташування в торцевій площині (хордальне чи тангенціальне).
3. Вибрати канат, вписати його діаметр d_k та його розривне зусилля $F_{розр}$.
4. Визначити діаметр пальців та втулок (на першому етапі можна приймати орієнтовно $d_n = 2d_k$, $d_{эм} = 4d_k$).
5. З умов компоновання агрегатів, сполучених муфтою, визначити відстань між фланцями та відповідно робочу довжину пальців l_p [3].
6. За формулою (12) визначити потрібний коефіцієнт запасу опору екстракції канату $\kappa_{зон}$ та прийняти більше значення.
7. Обчислити потрібне зусилля затягування каната $F_{зам}$ за формулою (6).

8. Прийняти діаметр нарізі на пальці найближчим до діаметра гладкої частини пальця d_n та виконати перевірку на сумісну дію розтягу і кручення за відомими формулами [5–7]. У випадку небезпеки руйнування нарізі збільшити діаметр втулки $d_{вт}$ або діаметр пальця d_n та повторити виконання пунктів 6...8 даного алгоритму.

9. Обчислити зусилля, що зрізатиме палець за формулою (15).

10. Перевірити палець на зріз та руйнування поверхонь, що контактують з канатом за відомими формулами [3, 5–7]. У випадку невиконання умов незрізання пальця збільшити його діаметр d_n та повторити виконання пунктів 6...10 даного алгоритму.

Приклад застосування отриманого алгоритму наведений в табл. 1 для випадку розрахунку муфти з хордально розташованими канатами, оснащеної затискними елементами, що розглянуті в даній роботі.

Таблиця 1 – Приклад розрахунку муфти з торцевими канатами хордального розташування

№ пункту алгоритму	Значення
1. Вихідні дані	$T = 800 \text{ Нм}, D = 145 \text{ мм}, z = 4.$
2. Робочий натяг канатів [3]	$F_H = 2988 \text{ Н}.$
3. Канат	$6 \times 19 + 1 \text{ ш.о. ISO 2408}, d_k = 5,0 \text{ мм}, F_{розр} = 13600 \text{ Н},$ маркерувальна група $\sigma_6 = 1770 \text{ МПа}.$
4. Діаметри пальців та втулок	$d_n = 12 \text{ мм},$ $d_{вт} = 24 \text{ мм}.$
5. Робоча довжина пальця	$l_p = 12 \text{ мм}.$
6. Коефіцієнт запасу опору екстракції канату (13)	$\kappa_{зон} \succ \frac{8 \times 24 \times 12}{(24^2 + 12^2)} = 3,19, \text{ приймаємо } \kappa_{зон} = 4,00.$
7. Сила затягування пальця (7)	$F_{зам} = 4 \times 1 \times 2988 = 11952 \text{ Н}.$
8. Перевірка нарізі пальця на сумісну дію розтягу та кручення	Нарізь М12, внутрішній діаметр $d_3 = 9,853 \text{ мм}.$ $\sigma = \frac{1,3 \times 4 F_{зам}}{\pi d_3^2} = \frac{1,3 \times 4 \times 11952}{3,14 \times 9,853^2} = 204 \text{ МПа}.$ Для матеріалу пальця приймаємо сталь 40ХС загартовану до 40...45 НРСе, $\sigma_m = 1080 \text{ МПа}.$ Запас міцності за границею текучості $s_p = \frac{\sigma_m}{\sigma} = \frac{1080}{204} = 5,29.$ Міцність пальця на розрив забезпечено.
9. Сила, що зрізає палець	$F_{зр} = 2988 \times (1 - 0,1 \times 4,0) = 1793 \text{ Н}.$
10. Перевірка пальця на зріз	$\tau_{зр} = \frac{4 F_{зр}}{\pi d_n^2} = \frac{4 \times 1793}{3,14 \times 12^2} = 16 \text{ МПа}.$ Для сталі 40ХС $\tau_m = 0,6 \sigma_m = 0,6 \times 1080 = 648 \text{ МПа}.$ $s_{зр} = \frac{\tau_m}{\tau_{зр}} = \frac{648}{16} = 40,5.$ Міцність пальця на зріз забезпечено.

Висновки. В результаті виконання теоретичних досліджень показано вплив механіки затиску сталевих канатів затискних елементів типу «палець – втулка – поперечний канат», передачу навантаження та міцність затискних елементів. Доведено, що при контрольованому затягуванні пальці затискних елементів необхідно встановлювати в отвори фланців напівмуфт з мінімальним зазором для уникнення їх зсуву силою натягу канатів в межах зазору в цьому сполученні. Розглянуто процес передачі робочого навантаження від втулок до фланців напівмуфт. При цьому з умови нерозкриття стику отримано вираз для обчислення потрібного коефіцієнту $\kappa_{зон}$ запасу опору екстракції канату в залежності від розмірів деталей затискних елементів (діаметрів пальця та втулки,

робочої довжини пальця), а також для обчислення осьового зусилля затягування пальця $F_{зам}$ та зусилля $F_{зр}$, на яке необхідно розраховувати пальці на зріз. З огляду на отримані результати, запропонований та апробований алгоритм проектування муфт з торцевими канатами.

Напрямки подальших досліджень. Слід відзначити, що запропонований підхід навіть після наведених уточнень має резерви для вдосконалення, оскільки в ньому не враховано контактну жорсткість стику «торець втулки – торець фланця напівмуфти» та поворот втулки від дії моменту M_H сили натягу F_H та, відповідно, можливе навантаження пальця частиною цього згинального моменту. Резерв відповідно становить визначення потрібного зазору між пальцем та втулкою, що здатен компенсувати нахил втулки в результаті контактних деформацій названого стику. Інший резерв формує відсутність у доступному масиві знань інформації про зріз канатів в умовах подібних до роботи їх в розглянутому затискному елементі, тому дослідження механіки процесу їх зрізу також становлять практичний інтерес.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент на корисну модель МПК F16D 3/00, № 106044. Муфта з тангенціальним розташуванням торцевих канатів. Заявник и патентовласник: Херсонська державна морська академія / Проценко В. О., Клементьєва О. Ю., заявка u201510868 від 06.11.2015, опубл. 11.04.2016, Бюл. №7.
2. Патент на корисну модель МПК F16D 3/00 // F16D 43/00, № 114482. Пружно-запобіжна муфта з тангенціальними канатами. Заявник и патентовласник: Херсонська державна морська академія. / Проценко В. О., Клементьєва О. Ю., заявка u201609425 від 12.09.2016, опубл. 10.03.2017, Бюл. №5.
3. Проценко В. О. Проектування муфти з торцевою установкою прямих канатів / В. О. Проценко // Гірничі, будівельні, дорожні, меліоративні машини. – К. : КНУБА, 2011. – Вип. 77. – С. 44–50.
4. Проценко В. О. Дослідження закріплення канатів затискними елементами муфт / В. О. Проценко, М. В. Бабій, О. Ю. Клементьєва // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2016. – № 838: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – С. 84–92.
5. Малащенко В. О. Деталі машин. Збірник завдань та прикладів розрахунків / В. О. Малащенко, В. Т. Павлице. – Львів : Новий Світ-2000, 2013. – 136 с.
6. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин / В. Т. Павлице. – Львів : Афіша, 2003. – 560 с.
7. Иванов М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов. – М. : Высшая школа, 1976. – 399 с.
8. Проценко В. О. Геометричні та силові параметри муфти з торцевою установкою канатів тангенціального розташування / В. О. Проценко, В. О. Настасенко, О. Ю. Клементьєва // Підйомно-транспортна техніка. Науково-технічний та виробничий журнал. – Одеса : Інтерпрінт, 2015. – №4 – С. 53–59.

REFERENCES

1. Patent na korisnu modelj MPK F16D 3/00, № 106044. *Mufta z tangencialnim roztashuvannyam torcevikh kanativ.* (2016). Zayavnik i patentovlasnik: Khersonsjka derzhavna morsjka akademiya / Protsenko V. O., Klementyeva O. Yu., zayavka u201510868.
2. Patent na korisnu modelj MPK F16D 3/00//F16D 43/00, № 114482. *Pruzhno-zapobizhna mufta z tangencialjnimi kanatami.* (2017). Zayavnik i patentovlasnik: Khersonsjka derzhavna morsjka akademiya. / Protsenko V. O., Klementyeva O. Yu., zayavka u201609425.
3. Protsenko, V. O. (2011). Proektuvannya mufti z torcevoyu ustanovkoyu pryamikh kanativ. *Girnichy, budiveljni, dorozhni, meliorativni mashini.* Kyiv : KNUBA, 77, 44–50.

4. Protsenko, V. O., Babiy, M. V. & Klementyeva, O. Yu. (2016). Doslidzhennya zakriplennya kanativ zatisknimi elementami muft. *Visnik Nacionaljnogo universitetu «Ljvivs'jka politehnika»*, 838: *Dinamika, micnistj ta proektuvannya mashin i priladiv*, 84–92.
5. Malathenko, V. O. & Pavlithe, V. T. (2013). *Detali mashin. Zbirnik zavdanj ta prikladiv rozrakhunkiv*. Lviv : Noviyj Svit-2000.
6. Pavlithe, V. T. (2003). *Osnovi konstruyuvannya ta rozrakhunok detaleyj mashin*. Lviv : Afisha.
7. Ivanov, M. N. (1976). *Detali mashin*. Moskva : Vihsshaya shkola.
8. Protsenko, V. O., Nastasenko, V. O. & Klementyeva, O. Yu. (2015). Geometrichni ta silovi parametri mufti z torcevoyu ustanovkoyu kanativ tangencialjnogo roztashuvannya. *Pidymno-transportna tekhnika. Naukovo-tekhnichnij ta virobnichij zhurnal*. Odesa : Interprint, 4, 53–59.

Проценко В. А., Клементьева О. Ю. УТОЧНЕНИЕ ПОДХОДА К РАСЧЕТУ ЗАЖИМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МУФТ С КАНАТНЫМИ ЗВЕНЬЯМИ РАСТЯЖЕНИЯ

В статье, за счет выполнения теоретических исследований, показано несовершенство существующего подхода к расчету зажимных элементов муфт с канатными звеньями растяжения. В ходе теоретических исследований показано влияние механики зажима стальных канатов зажимных элементов типа «палец – втулка – поперечный канат» на передачу нагрузки и прочность зажимных элементов. Доказано, что при контролируемом затяжении пальцы зажимных элементов необходимо устанавливать в отверстия фланцев полумуфт с минимальным зазором во избежание их смещения силой натяжения канатов в пределах зазора. Рассмотрен процесс передачи рабочей нагрузки от втулок к фланцам полумуфт. При этом из условия нераскрытия сжатия получено выражение для вычисления нужного коэффициента запаса сопротивления экстракции каната в зависимости от размеров деталей зажимных элементов, а также для вычисления осевого усилия затяжки пальца и усилия при котором необходимо рассчитывать пальцы на срез. Учитывая полученные результаты, предложен и апробирован алгоритм проектирования муфт с торцевыми канатами.

Ключевые слова: зажимной элемент, тормоз, канатные звена, структура, синтез.

Protsenko V. O., Klementyeva O. Yu. CLARIFICATION OF THE APPROACH TO THE CALCULATION OF CLAMPING ELEMENTS OF CLUTCHES WITH ROPE TENSION LINKS

In the article, due to the implementation of theoretical studies, the imperfection of the existing approach to the calculation of clamping elements of clutches with cable stretching links is shown. In the course of theoretical studies, the influence of the clamping mechanics of the steel ropes of the clamping elements of the «finger – bushing – transverse rope» type on load transfer and the strength of the clamping elements is shown. It has been proved that, under controlled tightening, the fingers of the clamping elements must be installed in the flange holes of the half-coupling with minimal clearance in order to avoid their displacement by the tension of the ropes within the gap. The process of transferring the workload from the bushings to the flanges of the half couplings is considered. At the same time, from the unconditioned compression condition, an expression is derived for calculating the required margin of drag of the rope extraction resistance, depending on the size of the clamping elements, and also for calculating the axial force of the finger tightening and the force at which the fingers are counted on the slice. Taking into account the obtained results, an algorithm for designing couplings with end ropes is proposed and approved.

Keywords: clamping element, brake, rope links, structure, synthesis.

© Проценко В. О., Клементьева О. Ю.

Статтю прийнято
до редакції 27.04.17

УДК629.5.081

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

Рашковский А. С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии судостроения Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова (г. Николаев), e-mail: alexrash@trion.mk.ua;

Нейман В. М., старший преподаватель кафедры экономики и организации судостроительного производства Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова (г. Николаев)

Для минимизации материальных и трудовых ресурсов и продолжительности строительства различных плавучих сооружений в судостроении проводится подготовка производства. В связи со спецификой применяемых материалов и технологии строительства композитных плавучих сооружений подготовка производства занимает продолжительное время, соизмеримое с продолжительностью строительства сооружений.

В статье приведены составляющие комплексной подготовки судостроительного производства, обеспечивающей готовность завода к выполнению программы строительства с заданными технико-экономическими показателями в установленные сроки, показаны пути ее совершенствования на примере строительства композитных плавучих доков.

Ключевые слова: композитные плавучие сооружения, плавучие доки, подготовка производства, трудоемкость работ.

Постановка проблемы. Производство композитных плавучих сооружений – это совокупность взаимосвязанных процессов подготовки производства, технологии и организации строительства. Укрупненное производство представляет совокупность следующих групп процессов: подготовка производства; непосредственно производство композитных плавучих сооружений; испытания, сдача, гарантийное и послегарантийное обслуживание.

Подготовка производства в судостроении представляет собой комплексную систему, обеспечивающую готовность завода к выполнению программы строительства заказов высшей категории качества с заданными технико-экономическими показателями в установленные сроки [1, 2]. Качественная подготовка производства существенно влияет на своевременное с минимальными затратами строительство доков.

В последние годы осваивается строительство различных композитных плавучих сооружений – плавучие доки, понтоны, плавучие гостиницы и рестораны, дебаркадеры и др. [3, 4]. Для успешного строительства композитных плавучих сооружений различных размерений, целевого назначения и степени сложности необходимо совершенствование подготовки производства, технологии, организации и качества выпускаемой продукции.

При строительстве композитных плавучих доков на ХГЗ «Паллада» существовали только отдельные виды подготовки производства (технологическая, материально-техническая). В результате проведенных исследований и разработок предложена и внедрена на заводе система комплексной подготовки судостроительного производства, представляющая собой совокупность взаимосвязанных процессов конструкторского, технологического, материально-технического, организационного, кадрового и экономического характера, направленная на создание и промышленное освоение доков различной подъемной силы (от 8500 т до 50000 т) с заданным объемом выпуска и уровнем качества в установленные сроки при наименьших материальных, трудовых и финансовых затратах [5].

Цель статьи – усовершенствовать подготовку судостроительного производства применительно к строительству композитных плавучих сооружений на примере

композитных плавучих доков, строящихся на Херсонском государственном заводе «Паллада» (ХГЗ).

Изложение основного материала. Применительно к строительству композитных плавучих доков разработана система комплексной подготовки, охватывающая все виды судостроительного производства и обеспечивающая наличие на заводе конструкторских, технологических и организационно-технических документов, сооружений и коммуникаций, подъемно-транспортного оборудования, средств технологического оснащения (СТО), квалифицированных кадров рабочих и инженерно-технического персонала, специализированных производственных подразделений, осуществляющих строительство композитных плавучих доков различных назначений, размерений и подъемной силы [5–7].

Конструкторская подготовка производства (КПП) представляет собой разработку проектных конструкторских документов, ведомостей заказа материалов и оборудования, принципиальной технологии и организации строительства композитного плавучего сооружения, выпуск конструкторских рабочих документов. КПП осуществляется контрагентом – конструкторской организацией.

Технологическая подготовка производства (ТПП) обеспечивает технологическую готовность завода к строительству композитного плавучего сооружения, а также заданный рост технического уровня производства.

Материально-техническая подготовка производства (МТПП) обеспечивает строительство композитного плавучего сооружения необходимыми материалами и комплектующими изделиями в соответствии с заказными ведомостями, запланированными объемами и сроками договорных поставок с учетом выполнения собственных работ.

Организационная подготовка производства (ОПП) включает согласованные коллективные действия работников завода, направленные на строительство композитного плавучего сооружения с заданным уровнем качества при минимальных трудовых и материальных ресурсах. В этом виде подготовки разрабатываются организационно-технологические документы, генеральный и каскадный графики строительства плавучего сооружения.

Подготовка кадров (ПК) обеспечивает строительство плавучих доков необходимыми кадрами рабочих и инженерно-технических работников путем их подготовки или переподготовки и повышения квалификации.

Экономическая подготовка производства (ЭПП) включает разработку экономически эффективных процессов и решений, обеспечивающих сокращение сроков строительства плавучего сооружения, снижение трудовых и материальных затрат без ущерба качества продукции с сохранением заданных технико-экономических показателей.

Распределение трудоемкости работ по отдельным видам комплексной системы подготовки производства после ее внедрения на ХГЗ композитных плавучих сооружений показано на рис. 1 [5].

Самый большой объем работ приходится на технологическую подготовку производства. Единичный или мелкосерийный характер производства создает необходимость выполнять работы по технологической подготовке производства в каждом производственном цикле. В этих условиях особое значение для сокращения сроков строительства плавучих доков, а также снижения их себестоимости, приобретает совершенствование технологической и организационной подготовки производства [6].

В результате исследования ряда элементов ТПП – системы документооборота, состава документов и их взаимосвязи определены виды основных работ технологической подготовки производства верфи (рис. 2).

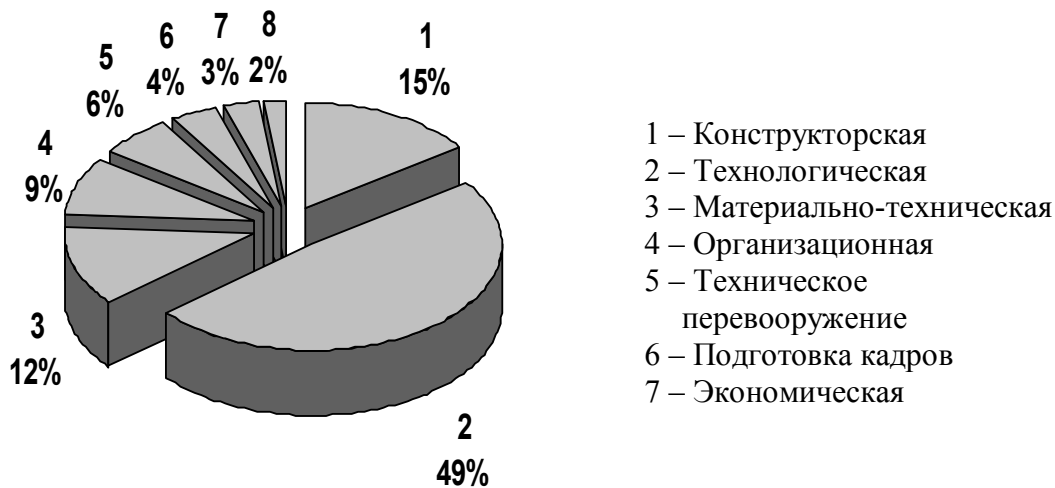


Рисунок 1 – Распределение трудоёмкости работ по комплексной подготовке судостроительного производства при строительстве композитных плавучих сооружений

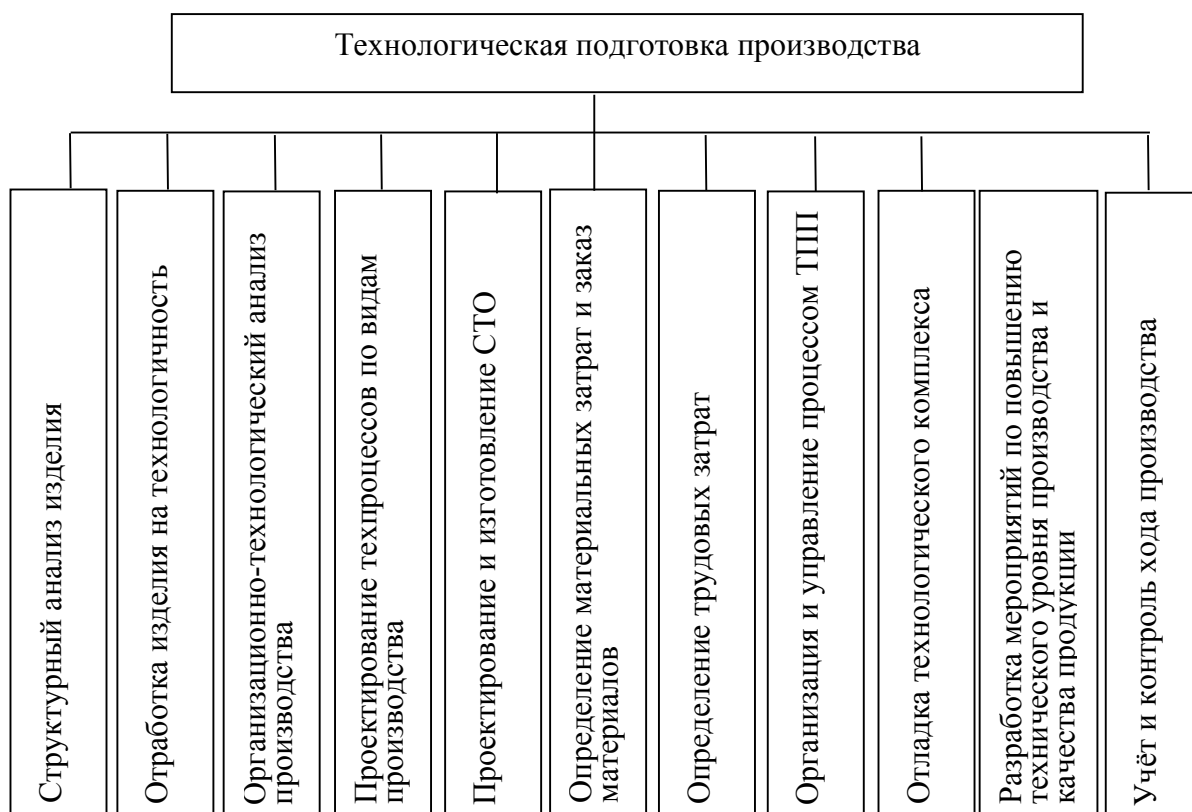


Рисунок 2 – Виды основных работ технологической подготовки производства верфи

Рассмотрены функции и задачи ТПП. Под функцией ТПП понимается комплекс задач, объединенных общей целью их решения. Это совокупность процессов формирования носителей (документов), выделенная по общности решаемых задач. Под задачей ТПП понимается законченная часть работ в составе определенной функции ТПП, т.е. совокупность процедур, выполняемых в определенной логической последовательности и определяющих процесс формирования одного или нескольких носителей информации [6]. В результате проведенного анализа системы ТПП определены: главная цель – обеспечение полной технологической готовности завода к строительству плавучего сооружения; перечень задач; процедуры, обеспечивающих формирование конкретных документов; состав документов и др.

После детализации функций, задач, работ и привязки к последним конкретного

набора документов и подразделений-разработчиков получена информационно-функциональную модель ТПП, раскрывающая всю цепочку от главной цели до конкретных задач и результатов ТПП в форме документов и их исполнителей. Такая модель позволяет представить весь состав документации, найти «узкие» места в процессе ее разработки и использования, определить направления совершенствования системы управления технологической подготовкой производства [7, 8].

МТПП обеспечивает закупку материалов и комплектующих изделий в соответствии с планом работ предприятия. Подготовка проводится по разработанному процессу закупок и нормам расхода материалов с учетом оценки поставщиков и выбора из них предпочтительных. Разработанная структурно-логическая схема МТПП для строительства композитных плавучих сооружений показана на рис. 3.

В ОПП включена разработка комплекта организационно-технологических документов, необходимых для строительства композитного плавучего сооружения: генеральный график; каскадный график; принципиальная технология, организация строительства и другие документы организационного характера.

Для обеспечения готовности предприятия к выполнению запланированных объемов производства проводится кадровая подготовка персонала. Разработаны планы подготовки, включающие: специальную профессиональную подготовку руководящих работников и персонала и подготовку по системе управления качеством, охране труда и технике безопасности; переподготовку и повышение квалификации персонала. На рис. 4. приведена разработанная структурно-логическая схема подготовки персонала для строительства композитных плавучих сооружений.

На рис. 3 и 4 приняты следующие обозначения: Д – директор; ГИ – главный инженер; ЗДО – заместитель директора по общим вопросам; ОМТС – отдел материально-технического снабжения; ЗДЭ – заместитель директора по экономике.

Самый большой объем работ приходится на технологическую подготовку производства. Единичный или мелкосерийный характер производства создает необходимость выполнять работы по ТПП в каждом производственном цикле. В этих условиях особое значение для сокращения сроков строительства композитных плавучих сооружений, а также снижения их себестоимости, приобретает совершенствование ТПП и ОПП [6]. Наибольшее значение для ТПП имеют укрупненные графики строительства композитных плавучих сооружений и ведомость их разбивки на планово-учетные единицы работ (ПУЕР) и платежные этапы.

Показателем общей эффективности ТПП является себестоимость строительства плавучего сооружения. Величина затрат на строительство определяется, в основном, технологией и организацией производственного процесса. Локальными критериями на этапе ТПП являются сроки строительства и трудоемкость работ цехов по заказу. Формирование и расчет рационального графика строительства осуществляется на основе взаимосвязи локальных критериев с учетом их подчиненности общему показателю эффективности управляемой системы, что обеспечивает возможность строительства в директивные сроки, рациональную загрузку исполнителей при минимальных затратах.

Математически задачу ТПП можно представить в виде формально-аналитической модели. В общем виде задача ТПП формулируется следующим образом: согласовать директивный срок и трудоемкость выполнения работ по заказу с ресурсами цехов, чтобы выполнялось условие:

$$F = |L_j - \sum_{z=1}^{z=m} \sum_{T_0}^{T_{\text{oup}}} l_{iz}| \rightarrow \min \quad \forall_i \in G(X, U), \quad (1)$$

$$X = \{x_i\}_{i=1, n}, \quad (2)$$

$$U = \{u_\alpha\}_{\alpha=1, \beta}. \quad (3)$$

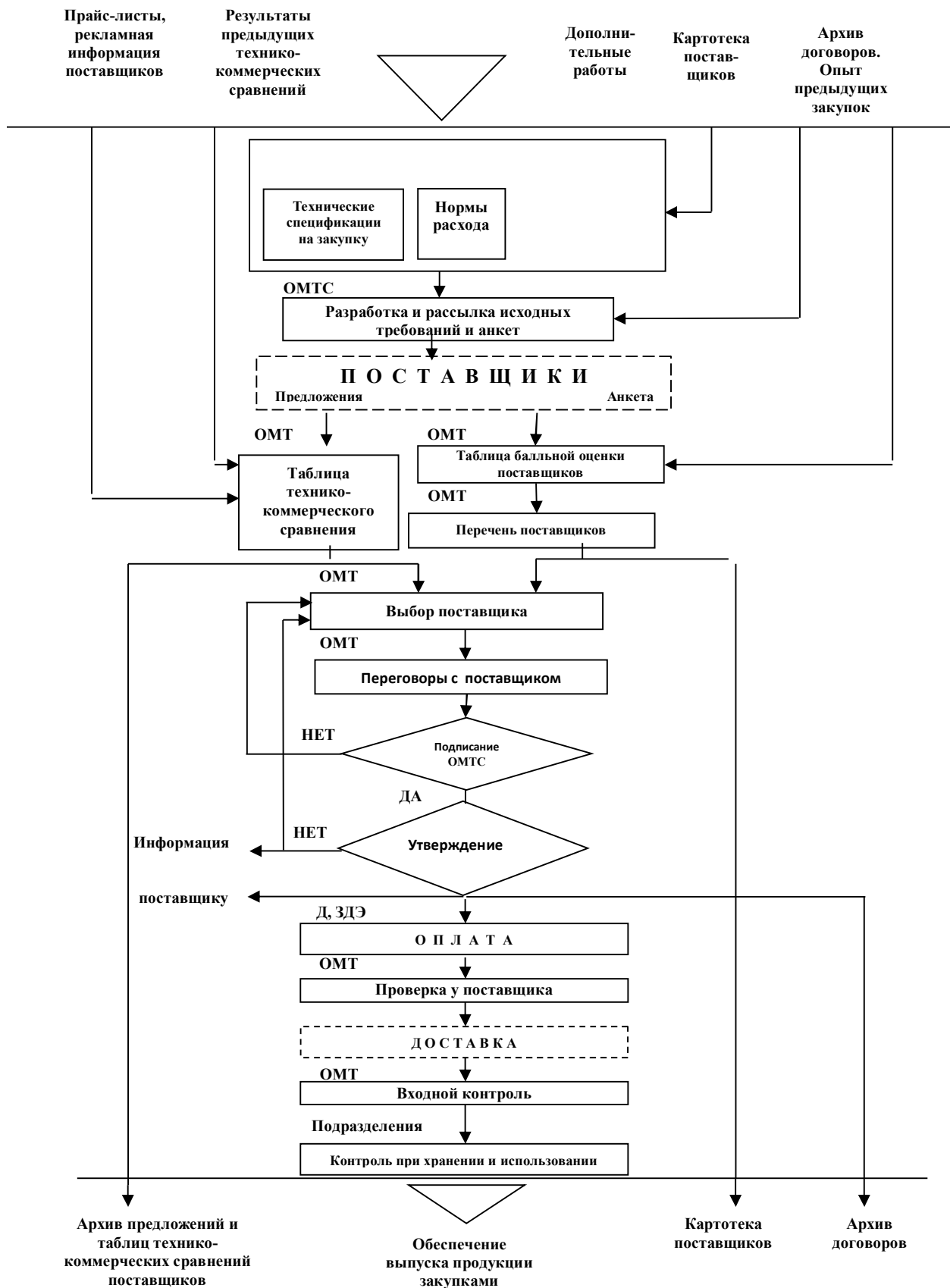


Рисунок 3 – Структурно-логическая схема материально-технической подготовки производства

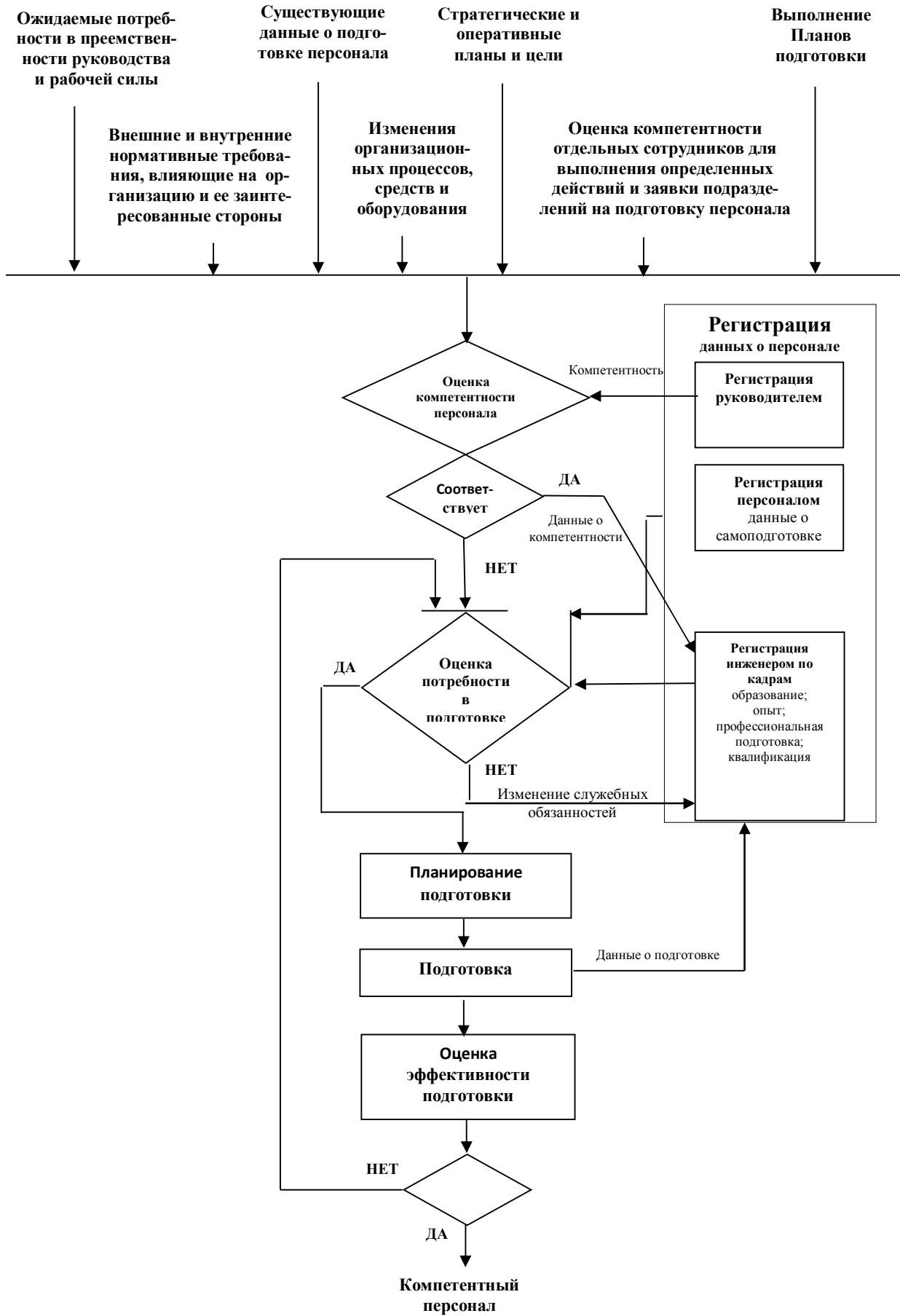


Рисунок 4 – Структурно-логическая схема подготовки персонала

При ограничениях:

$$t_j^{kp} \leq t_j^{\text{dup}};$$

$$\sum_{t=t_0}^{t=t_1} l_{iz} \leq l_j^z, \quad \forall_i: t_i \in [t_0, t_1];$$

$$t_i^h(k) < t_i(k) < t_i^o(k);$$

где L_j – заданная трудоемкость постройки заказа j ; l_{iz} – плановая трудоемкость i -й работы сетевого графика; $G(X,U)$, граф; t_j^{kp} – продолжительность критического пути заказа j ; t_j^{dup} – продолжительность директивного пути заказа j ; l_j^z – допустимый уровень трудоемкости цеха z при выполнении работ по заказу j в интервале времени $[t_0, t_1]$; $t_i(k)$ – срок выполнения работы i , ограниченный интервалом времени $[t_i^h(k), t_i^o(k)]$.

В процессе реализации целей ТПП и ОПП возможна различная постановка задач в зависимости от выбранного критерия оптимальности. Выбор критерия определяется технологией и характеристиками строящегося плавучего сооружения, а также организационными особенностями завода-строителя.

Выбранные критерии одновременно учесть невозможно, т.к. в этом случае задача ТПП и ОПП становится неразрешимой. В связи с этим могут быть решены задачи: при заданном времени строительства рационально распределяются ресурсы, затрачиваемые на его выполнение; при заданном наличии ресурсов отыскивается такое их распределение, при котором минимизируется продолжительность строительства.

В процессе реализации ТПП и ОПП в общую модель производства может включиться новый заказ. Поэтому определяется состав и объем работ на этапах строительства этого заказа, их взаимосвязь и последовательность выполнения, согласовывается порядок организации работ всех предприятий-контрагентов, выделяемые ресурсы распределяются по этапам строительства.

Формирование исходного графика строительства композитного сооружения представляет собой многошаговый процесс последовательного улучшения варианта распределения состава и трудоемкости работ по этапам строительства. Исходный график, удовлетворяющий заданным ограничениям, может быть получен как в результате изменения интенсивности (режима) выполнения работ, так и за счет проведения организационных мероприятий, направленных на изменение объема выделенных ресурсов. Этот график служит основой при утверждении директивных сроков строительства композитного сооружения, выделении необходимых ресурсов и привлечении к участию соответствующих контрагентов.

Специфической особенностью управления судостроительным производством является применение специальной системы планово-учетных единиц работ (ПУЕР) [9]. Создание в судостроении системы ПУЕР обусловлено большой конструктивной сложностью и длительным циклом строительства судостроительных объектов, их необходимостью для организации планирования, учета, контроля и регулирования производства. Система ПУЕР обеспечивает: охват всего количества работ по строительству заказов; технологическую последовательность и комплектность выполнения работ всеми подразделениями завода-строителя; планирование, контроль и учет выполнения работ; агрегацию информации по уровням управления; автоматизацию процессов информационной обработки производственных показателей. Блок-схема основных организационных процедур ТПП при строительстве композитных плавучих сооружений приведена на рис. 5.

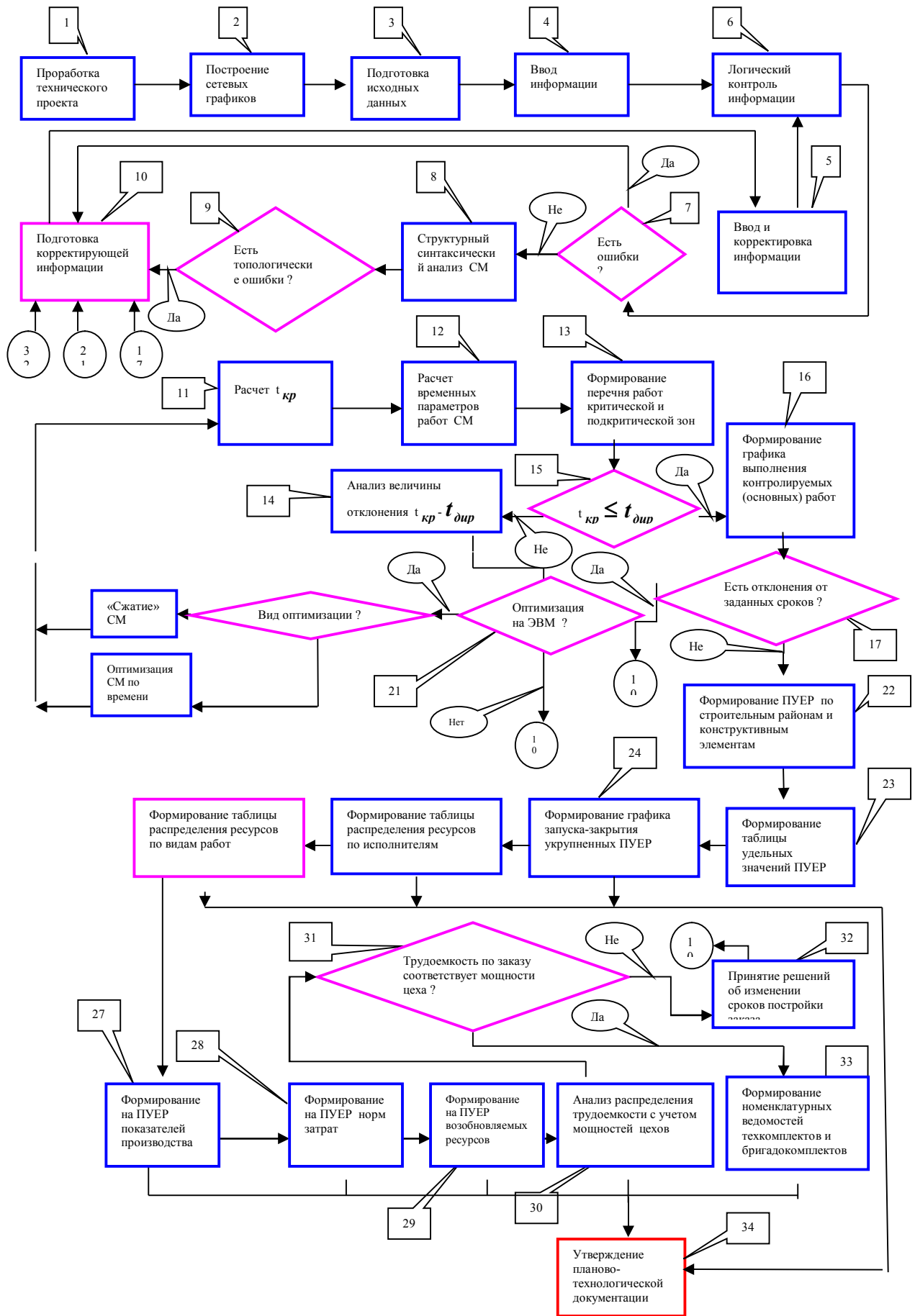


Рисунок 5 – Блок-схема основных организационных процедур ТПП для строительства композитного плавучего сооружения

Выводы. Показаны пути совершенствования судостроительного производства для строительства композитных плавучих сооружений при наименьших материальных, трудовых и финансовых затратах на примере строительства композитных плавучих доков, строящихся на ХГЗ «Паллада».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арью А. Р. Комплексная подготовка производства в судостроении / А. Р. Арью. – Л. : Судостроение, 1988. – 336 с.
2. Риммер А. И. Подготовка производства в судостроении / А. И. Риммер. – Л. : Судостроение, 1976. – 252 с.
3. Слуцкий Н. Г. Строительство железобетонных плавучих сооружений в Украине / Н. Г. Слуцкий, В. Ф. Маломан, А. С. Рашковский // Рыбное хозяйство Украины. Специальный выпуск «Морские технологии: проблемы и решения – 2004» – Керчь : КМТИ, 2004. – № 7. – С. 11–14.
4. Слуцкий Н. Г. Состояние и перспективы строительства композитных плавучих сооружений / Н. Г. Слуцкий // Материалы международной научно-технической конференции «Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов» (БМС–2004). – Николаев : НУК, 2004. – С. 85–87.
5. Рашковский А. С. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков: монография / А. С. Рашковский, Н. Г. Слуцкий, В. Н. Конов, А. В. Щедролов, А. Н. Узлов. – Николаев : РАЛ-полиграфия, 2008. – 614 с.
6. Слуцкий Н. Г. Управление организационно-технологической подготовкой строительства композитных плавучих сооружений / Слуцкий Н. Г. // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2005. – № 4 (403). – С. 137–144.
7. Нейман В. М. Функциональный подход к моделированию организационно-технологической подготовки производства в судостроении / В. М. Нейман // Рыбное хозяйство Украины. Специальный выпуск «Морские технологии: проблемы и решения – 2004» – Керчь : КМТИ, 2004. – № 7. – С. 8–11.
8. Нейман В. М. Обеспечение качества строительства композитных плавучих доков / В. М. Нейман // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2017. – № 1. – С. 3–9.
9. Рашковский А. С. Совершенствование конструкции ремонтных плавучих доков / А. С. Рашковский, А. В. Щедролов, В. Н. Перов // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2016. – № 1. – С. 11–18.
10. Рашковский А. С. Специфика подготовки производства для строительства композитных и железобетонных плавучих сооружений / А. С. Рашковский, Н. В. Цыкало, А. В. Щедролов // Международный журнал об инновациях в судостроении «Судостроение и морская инфраструктура». – Николаев : НУК, 2015. – № 2. – С. 121–131.

REFERENCES

1. Arjyu, A. R. (1988). *Kompleksnaya podgotovka proizvodstva v sudostroenii*. Lvov : Sudostroenie, 1988.
2. Rimmer, A. I. (1976). *Podgotovka proizvodstva v sudostroenii*. Lvov : Sudostroenie.
3. Sluckiyj, N. G., Maloman, V. F. & Rashkovskiyj, A. S. (2004). *Stroiteljstvo zhelezobetonnykh plavuchikh sooruzhenij v Ukraine Rihbnoe khozyayjstvo Ukrainih. Specialjnihyj vihpusk «Morskie tekhnologii: problemih i resheniya – 2004»*. Kerch : KMTI, 7, 11–14.
4. Sluckiyj, N. G. (2004). *Sostoyanie i perspektivih stroiteljstva kompozitnykh plavuchikh sooruzhenij. Materialih mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoyj konferencii «Bezopasnostj moreplavaniya i ee obespechenie pri projektirovanii i postroyjke sudov» (BMS–2004)*. Nikolaev : NUK, 85–87.

5. Rashkovskiy, A. S., Sluckiy, N. G., Konov, V. N., Thedrolosev, A. V. & Uzlov, A. N. (2008). *Proektirovanie, tekhnologiya i organizaciya stroitelstva kompozitnikh plavuchikh dokov: monografiya*. Nikolaev : RAL-poligrafiya.
6. Sluckiy, N. G. (2005). Upravlenie organizacionno-tekhnologicheskoy podgotovkoy stroitelstva kompozitnikh plavuchikh sooruzheniy. *Zbirnik naukovikh pracj NUK*. Mikolaiv : NUK, 4 (403), 137–144.
7. Neyjman, V. M. (2004). Funkcionalnij podkhod k modelirovaniyu organizacionno-tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva v sudostroenii. *Rihbnoe khozyaystvo Ukrainih. Specialnij vihpusk «Morskie tekhnologii: problemih i resheniya*. Kerchj : KMTI, 7, 8–11.
8. Neyjman, V. M. (2017). Obespechenie kachestva stroitelstva kompozitnikh plavuchikh dokov. *Zbirnik naukovikh pracj NUK*. Mikolaiv : NUK, 1, 3–9.
9. Rashkovskiy, A. S., Thedrolosev, A. V. & Perov, V. N. (2016). Sovershenstvovanie konstrukcii remontnikh plavuchikh dokov. *Zbirnik naukovikh pracj NUK*. Mikolaiv : NUK, 2016, 1, 11–18.
10. Rashkovskiy, A. S., Cihkalo, N.V., Thedrolosev, A.V. (2015). Specifika podgotovki proizvodstva dlya stroitelstva kompozitnikh i zhelezobetonnikh plavuchikh sooruzheniy. *Mezhdunarodnij zhurnal ob innovacijakh v sudostroenii «Sudostroenie i morskaya infrastruktura»*. Nikolaev : NUK, 2, 121–131.

Рашковський О. С., Нейман В. М. УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ БУДІВНИЦТВА КОМПОЗИТНИХ ПЛАВУЧИХ СПОРУД

Для мінімізації матеріальних та трудових ресурсів і тривалості побудови різних плавучих споруд в суднобудуванні проводиться підготовка виробництва. У зв'язку зі специфікою матеріалів, що застосовуються та технології побудови композитних плавучих споруд підготовка виробництва займає тривалий час, порівняно з тривалістю побудови споруд.

У статті наведені складові комплексної суднобудівної підготовки виробництва, які забезпечують готовність заводу до виконання програми побудови із заданими техніко-економічними показниками та у встановлені строки, показані шляхи її вдосконалення на прикладі побудови композитних плавучих доків.

Ключові слова: плавучі доки, підготовка виробництва, трудомісткість робіт, композитна плавуча споруда

Rashkovskiy A. S., Nejman V. M. IMPROVEMENT OF PRODUCTION OF PREPARATION FOR CONSTRUCTION OF COMPOSITE FLOATING FACILITIES

To minimize the material and labor resources and duration of the construction of various floating structures, production preparation is performed in shipbuilding. In connection with the specifics of the materials used and the technology of construction of composite floating structures, the preparation of production takes a long time, commensurate with the duration of construction of the facilities.

The article presents the components of the integrated preparation of the shipbuilding production, which ensures the readiness of the plant to implement the construction program with the specified technical and economic indicators in the established timeframe. It also shows the ways of its improvement using the example of construction of composite floating docks.

Keywords: composite floating structures, floating docks, preparation of production, labor intensity.

© Рашковський О. С., Нейман В. М.

Статтю прийнято
до редакції 2.06.17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА ПРИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ И ОБВОДНЕНИИ СМАЗКИ В ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Сапига В. В., к.т.н., доцент кафедры корабельной энергетики и электроэнергетических систем Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: sapiga.seb@gmail.com

Ермошкин Н. Г., к.т.н., доцент, профессор кафедры корабельной энергетики и электроэнергетических систем Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: seu@ma.odessa.ua

Игнатенко А. А., и.о. начальника кафедры корабельной энергетики и электроэнергетических систем Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: seu@ma.odessa.ua

Целью работы является совершенствование методов анализа динамики судовых валопроводов с гидродинамическими подшипниками. Методология. Синтез методов динамического анализа роторных систем с подшипниками жидкостного трения, учитывающих изменение упруго-демпфирующих свойств несущего слоя проводился в два этапа. На первом этапе решение задачи, динамики судового валопровода заключалось в определении неконсервативных сил в несущем слое, являющимися откликом на внешнюю переменную гармоническую нагрузку. На втором этапе решалась задача динамики судового валопровода в условиях анизотропии несущего слоя, вызванной процессами диффузии и массопереноса в гидравлическом тракте подшипника. Результаты. Проведено моделирование поведения роторной системы на основе созданной конечно-элементной модели судового валопровода морского траулера. Получены круговые диаграммы виброперемещений осей цапф по траекториям подвижного равновесия в опорах судового валопровода при различной степени обводнения смазочного масла. Новизна. Получила дальнейшее развитие методика проведения динамического анализа роторных систем, учитывающая процессы диффузии и массопереноса обводнённого масла в гидравлическом тракте радиального гидродинамического подшипника. Практическое значение. Полученные параметры виброперемещений осей цапф по траекториям подвижного равновесия в опорах судового валопровода позволяют дополнить существующие системы мониторинга технического состояния, а также дает возможность разрабатывать алгоритмы действий оператора в экстремальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: *судовой валопровод, радиальный гидродинамический подшипник, вибрация, моделирование.*

Введение. Современный этап развития судовой энергетики характеризуется устойчивой тенденцией к комплексной автоматизации управления насыщенным энергоёмким оборудованием морских транспортных средств, заставляющая проектантов искать компромисс между сложностью объекта и его безопасностью на протяжении всего жизненного цикла судна.

Постановка задачи исследования и её связь с практическими вопросами. Анализ видов опасностей и распределение аварийных случаев свидетельствуют о том, что на потерю хода и управляемости вследствие отказа главного двигателя, редуктора или вало-винторулевого комплекса приходится до 43 % аварийных случаев. При этом, достаточная протяженность судовой валолинии, размещение в различных отсеках и вне корпуса судна, использование пожароопасных рабочих сред в муфтах, передачах, опорных и упорных узлах делают валопровод одним из наиболее уязвимых элементов судовой энергетической установки, выход из строя которого приводит к потери хода и срыву выполняемых задач. Учитывая сложность и разветвлённость судовых валопроводов, их подсистем и элементов, а также невозможность проведения натурных испытаний на судах в обстановке, приближенной к экстремальной, делают незаменимым средством для их исследования методы инженерного анализа.

Таким образом, обеспечение безопасности судового валопровода в экстремальных условиях плавания судна требует решения задачи по сохранению его работоспособности в

условиях, обусловленных эксплуатационными воздействиями и аварийными повреждениями энергетической установки и судна в целом, и определяет актуальность темы исследования.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы методологии динамического анализа роторных систем, основанные на аналитическом представлении основных действующих факторов, освещены в работах [1, 2–6]. Авторами этих фундаментальных исследований рассмотрены и классифицированы основные причины, вызывающие вибрацию роторов; изложены подходы к динамическому анализу многоопорных валов; приведен анализ динамики роторов с учётом их переменной жесткости, гироскопических эффектов, силовых и температурных деформаций. Вместе с тем, необходимо отметить, что гидродинамические реакции подшипников в этих работах представляются в линеаризованном виде, что приводит к упрощению расчётной модели в отношении свойств смазочного материала, режима его течения, условий работы и т.п.

Аспекты динамического анализа многоопорных валопроводов, основанного на аналитическом представлении основных действующих факторов, что позволяет существенно сократить число степеней свободы рассматриваемой роторной системы, отражены в работах [7–9]. В основе разработанных подходов лежит декомпозиция роторной системы на составляющие её подсистемы по критерию слабых динамических взаимодействий между ними. Отметим, что нелинейность реакций опор скольжения в этих работах не рассматривается, хотя принципиально предложенный подход пригоден для их описания. Уйти от обособленного рассмотрения явлений, происходящих в роторной системе, и перейти к динамическому анализу комплекса «ротор – подшипники», представляющего собой автоколебательную систему с устойчивым предельным циклом, размеры которого удовлетворяют условиям работоспособности подшипников в широком диапазоне рабочих частот вращения ротора, удалось авторам работ [2, 5]. Распространение моделей и методов динамического анализа этих работ на объекты судовой техники связано с адаптацией расчетных методик к условиям работы многопролетных низкооборотных валов с гидродинамическими подшипниками на индивидуальной смазке в составе энергетических установок судов транспортного, промышленного, технического и военно-морского флота.

Фундаментальными и прикладными исследованиями, проводимыми в Национальном университете «Одесская морская академия», созданы теоретические основы разработки судовых роторных систем, реализующих процессы гидродинамического удержания осей и стабилизации колебаний валов, функционирующие на принципах управления положением шипов в зазорах подшипников путём изменения потенциальной и кинетической энергии рабочей жидкости [10]. Несмотря на довольно полный охват проблемы функционирования систем стабилизации и удержания валов в подшипниках на гетерогенном смазочном материале, автором этой работы при анализе динамики судовых валопроводов не учитывалось воздействие технологических неточностей и дефектов элементов роторных систем, их крутильных и изгибных колебаний на устойчивость движения валов в опорах. Практически не изученными остались процессы диффузии и массопереноса в гидравлическом тракте индивидуальных систем смазки подшипников. Отметим, что пренебрежение этими факторами приводит к завышению расчетных оценок пределов виброустойчивости многопролетных валопроводов при прогностическом моделировании колебательного движения роторов пропульсивных установок кораблей и судов.

Выполненный анализ последних исследований и публикаций показал отсутствие адекватных современным требованиям научных результатов и созданных инструментальных средств динамического анализа судовых валопроводов с гидродинамическими подшипниками на индивидуальной смазке. Это приводит к тому, что при эксплуатации валопроводов на протяжении всего жизненного цикла морского

транспортного средства практически не реализуются комплексы оптимизационных задач, обеспечивающие заданные показатели надежности и эффективности энергетической установки и всего судна в целом.

Цель статьи – совершенствование методов анализа динамики судовых валопроводов с гидродинамическими подшипниками на основе конечно-элементной (КЭ) модели объекта исследования, учитывающих изменение упруго-демпфирующих характеристик несущего слоя вследствие поступления воды в индивидуальную систему смазки радиального гидродинамического подшипника.

Основное содержание. Применительно к судовому валопроводу, как отдельной крутильно-колебательной системе, задача динамики сводится к решению ряда вопросов, направленных на обеспечение устойчивости пространственного положения вала в опорах при действии возмущений, генерируемых как работой главного двигателя, так и движителя. Решение задачи динамики судового валопровода, в нашем случае, связано с расширением зоны функционирования трибоузлов традиционной конструкции в условиях дестабилизирующих воздействий эксплуатационных факторов. Моделирование поведения роторной системы сопряжено с необходимостью решать совместную задачу теории колебаний и гидродинамики, достаточно сложно формализуемую. Но формализованный подход к решению задачи динамики на фоне ее сложности позволяет сформировать доступную вычислительную процедуру, которая, в свою очередь, дает необходимое решение применительно к реальным объектам. За основу для математического моделирования принят судовый валопровод рыбо-крилевого траулера-супер (РКТ-С) проекта 16080, получающий вращение от дизель-редукторного агрегата, генерирующего мощность, равную 4410 кВт, и передающий крутящий момент на 4-х лопастной ВРШ диаметром 3,7 м при номинальных оборотах линии вала – 146 об/мин. Таким образом, моделируется роторная система с относительно невысокими скоростями вращения, но имеющая значительную протяженность, большие массы и расположенная на судне, которое само представляет упругую подвижную систему.

Для решения задачи динамики судового валопровода воспользуемся математическим аппаратом метода конечных элементов, позволяющим крутильно-колебательную систему представить в виде набора конечных элементов (рис. 1), обладающих соответствующими свойствами и дающих возможность учитывать инерционные и гироскопические моменты, крутильные и изгибные колебания для различных по форме валов с учетом реакций опор [11–13].

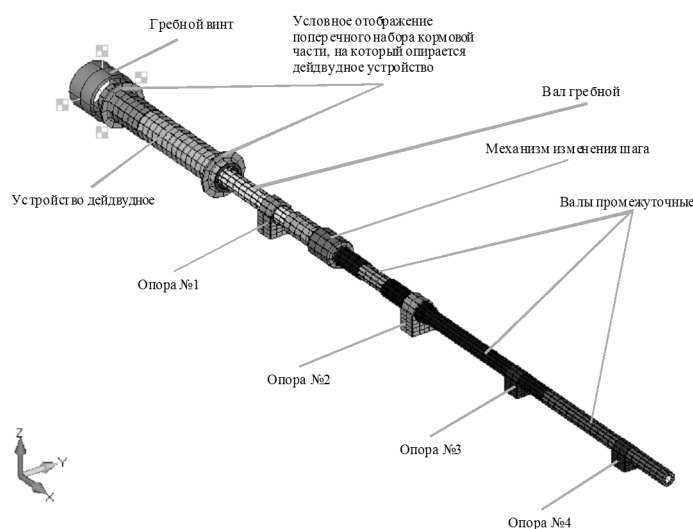


Рисунок 1 – КЭ-модель судового валопровода РКТ-С пр. 16080

Уравнение для механической системы, обладающей n -степенями свободы и определяемой координатами x_1, x_2, \dots, x_n , приведем к виду [14, 15]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} = Q_i(t), \quad (1)$$

где T, Π, Φ – соответственно кинетическая, потенциальная энергии, диссипативная функция, представленные в виде $T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j$; $\Pi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_i x_j$; $\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j$; $Q_i(t)$ – возмущающие усилия; m_{ij}, c_{ij}, d_{ij} – коэффициенты инерции, жесткости и демпфирования.

После подстановки значений кинетической, потенциальной и энергии диссипации в уравнение (1), получим систему линейных дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} m_{11} \ddot{x}_1 + \dots + m_{1n} \ddot{x}_n + d_{11} \dot{x}_1 + \dots + d_{1n} \dot{x}_n + c_{11} x_1 + \dots + c_{1n} x_n &= Q_1(t) \\ m_{21} \ddot{x}_1 + \dots + m_{2n} \ddot{x}_n + d_{21} \dot{x}_1 + \dots + d_{2n} \dot{x}_n + c_{21} x_1 + \dots + c_{2n} x_n &= Q_2(t) \\ \dots &\dots \\ m_{n1} \ddot{x}_1 + \dots + m_{nn} \ddot{x}_n + d_{n1} \dot{x}_1 + \dots + d_{nn} \dot{x}_n + c_{n1} x_1 + \dots + c_{nn} x_n &= Q_n(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

или в компактном виде:

$$\sum_{k=1}^n (m_{ik} \ddot{x}_k + d_{ik} \dot{x}_k + c_{ik} x_k) = Q_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

В матричном виде система уравнений (2) примет вид:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [D]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} = \{Q\}, \quad (4)$$

где $[M]$ – матрица масс:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix};$$

$[D]$ – матрица коэффициентов демпфирования:

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix};$$

$[C]$ – матрица коэффициентов жесткостей:

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix};$$

$\{x\}$ – матрицы-столбцы обобщенных координат:

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{Bmatrix};$$

$\{Q\}$ – матрица-столбец возмущающих усилий:

$$\{Q\} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_n \end{Bmatrix}.$$

Используя представленные выше выражения для кинетической, потенциальной энергии и диссипативной функции, а также заменив координаты x_1, x_2, \dots, x_n на новые – $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ (матрицы-столбцы узловых ускорений, скоростей и перемещений), характеризующие пространственное положение осей валов в опорах, получим уравнение динамики судового валопровода в виде [16]:

$$[M]\{\ddot{\varphi}\} + [D]\{\dot{\varphi}\} + [C]\{\varphi\} = \{Q\}. \quad (5)$$

Уравнение динамики судового валопровода в матричном виде (5) позволяет не только представить расчетные выражения для системы со многими степенями свободы в компактном виде, но и сформировать вычислительную процедуру по определению собственных и вынужденных колебаний. Для получения численных значений уравнения (5) используется метод прямого интегрирования, реализованный в программе NX Nastran.

Очевидно, что в прямой постановке решение задачи динамики судового валопровода в условиях дестабилизирующих воздействий эксплуатационных факторов представляет большие трудности, а в отдельных случаях делает её решение невозможным. Поэтому в КЭ-модели судового валопровода (рис. 1) используются ряд допущений:

- модель представляет собой многоопорную неразрезную балку ступенчато-переменного сечения;
- нагрузка считается распределенной на соответствующих участках [11];
- валы, входящие в состав судового валопровода, представляют собой изотропные твердые тела, обладающие массой;
- массы равномерно распределены по длине валопровода или сосредоточены в центрах масс;
- продольные колебания вала малы;
- фланцевые соединения моделируются жесткими связями;
- закрепление промежуточных опор валопровода выполнено на абсолютно жестком основании;
- положение вала определяется координатами центра масс механической системы, испытывающей собственные и вынужденные колебания [10].

Представленная КЭ-модель судового валопровода РКТ-С пр. 16080, включающая 2368 элементов с соответствующими граничными условиями, позволяет провести линейный анализ динамики роторной системы, не учитывающий переходные процессы в элементах валопровода. Моделирование поведения смазочного слоя в радиальном гидродинамическом подшипнике в данной КЭ-модели осуществляется путем задания упруго-демпфирующих свойств опоры через коэффициенты жесткости и демпфирования.

Проведенные ранее экспериментальные исследования [17, 18], посвященные обеспечению функционирования судового (корабельного) валопровода в экстремальных условиях, связанных с поступлением воды в систему смазки радиального гидродинамического подшипника (далее – РГП), было установлено, что при степени обводнения смазочного материала до $k = 15\%$ полидисперсный смазочный материал

представляет собой гомогенную структуру. При этом, процессы массопереноса полидисперсного смазочного материала на напорном участке системы индивидуальной смазки РГП аналогичны, как при работе трибоузла на смазочном масле при повседневной эксплуатации. В работах [17, 18] установлено, что при $k > 15\%$ происходит интенсивное вспенивание эмульсии, вызываемое наличием в эмульгированном смазочном материале нерастворенных газов, изменяющих упругость несущего слоя и, как следствие, вызывает резкое снижение минимальной толщины смазочного слоя. Поведение данного гетерогенного смазочного материала не поддается описанию с позиции классического реологического закона Ньютона-Стокса и в дальнейшем обводненный смазочный материал представляет собой жидкость с аномальной вязкостью [10, 17].

Моделирование поведения судового валопровода в условиях обводнения смазки в подшипниках следует вести в соответствии с разработанными методологическими подходами к решению задач диффузии и массопереноса в гидравлическом тракте радиального гидродинамического подшипника [19, 20], а также с учетом эволюционных трансформаций смазочного материала в клиновидном зазоре подшипника [21], используя следующую методику.

1. Решается задача динамики судового валопровода при малых значениях обводнения $k \leq 15\%$ (изотропный материал), в результате чего определяются начальные положения цапф валопровода в трибоузлах, исходные распределения давления, концентрации компонент, компонент скорости движения смазочного материала, коэффициенты жесткости и демпфирования изотропного несущего слоя.

2. С целью создания универсальности рассматриваемой методики решения вязкостные характеристики обводненного смазочного материала определяются эмпирической зависимостью, полученной в работах [10, 22]:

$$\mu_{эм} = a_2 \exp\left(-\frac{b_2 T_m}{1 - C_m}\right), \quad (6)$$

где T_m , C_m – сеточные распределения температуры смазочного материала и концентрации дисперсной фазы; a_2 и b_2 – эмпирические коэффициенты (например, для водомасляных эмульсий при $T = 35 - 80^\circ\text{C}$: $a_2 = 0,2345$; $b_2 = 0,0355$).

Для исследователей, оперирующих понятием «условной вязкости», здесь можно воспользоваться методологическим подходом, представленным в монографии [6].

3. На данном этапе решается задача диффузии, используя для этого модифицированное уравнение диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \underbrace{\sum_{\alpha=1}^2 v_{\alpha}(x, t) \frac{\partial C}{\partial x_{\alpha}}}_{A_{1\varphi}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left(D(x) \frac{\partial C}{\partial x_{\alpha}} \right)}_{k_{\varphi}} = f(x, t), \quad x \in \Omega, \quad 0 < t \leq C, \quad (7)$$

где k_{φ} – оператор диффузионного переноса; $A_{1\varphi}$ – оператор конвективного переноса (для рассматриваемого случая $A = A_1$); Ω – расчетная область, с учетом заданных граничных и начальных условий:

$$C(x, t) = g(x, t), \quad x \in \partial\Omega, \quad 0 < t \leq T,$$

$$C(x, 0) = 0, \quad x \in \Omega.$$

В результате решения уравнения (7) получаем функцию распределения концентрации дисперсной фазы в дисперсной среде, находящейся в масляной емкости (картер) подшипника скольжения [19]:

$$\|L^{h\tau}(c)_{h\tau} - f^{h\tau}\|_{h\tau}^C \leq M_1 h^n + N_1 \tau^p,$$

$$\|b^{h\tau}(c)_{h\tau} - g^{h\tau}\|_{h\tau}^G \leq M_2 h^n + N_2 \tau^p.$$

4. На следующем этапе решается задача вращения частично погруженного сегмента смазочного диска в обводненный смазочный материал. Данная задача сводится к решению системы уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости и сплошности в сферических координатах, дополненная уравнением момента сопротивления частично погруженного смазочного диска [20]:

$$\frac{d\omega_{\Delta}}{dt} = M_{fr},$$

где M_{fr} – безразмерный момент вязких сил трения, приложенных к диску со стороны жидкости, учитывающий трение о боковую и торцевую поверхности диска.

5. Физические и кинематические параметры, полученные в ходе решения предыдущей задачи, являются входными данными для решения системы уравнений [10]:

$$\int_0^{h_b} B_i V_{xi} y dy + \int_{h_b}^h B_i V_{xi} y dy = \frac{dC_i}{dy}, \quad (i = 1, 2);$$

$$\frac{d}{dx} \left(\sum_{i=1}^2 \int_0^{h_b} \rho_i B_i V_{xi}^2 y dy + \int_{h_b}^h \rho_1 B_1 V_{x1}^2 y dy \right) = -\frac{h^2}{2} \frac{dp}{dx}; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^2 \left(\frac{d}{dx} \int_0^{h_b} \rho_i B_i V_{xi}^2 y dy - V_i \frac{d}{dx} \int_0^{h_b} \rho_i B_i V_{xi} y dy \right) = -h_b \frac{dp}{dx},$$

дополненной условиями гладкого сопряжения:

$$V_{xi} = \begin{cases} (V_{1x} - V_{wi}) f\left(\frac{y}{h}\right) + V_{wi} & \text{при } 0 \leq y \leq h_b, \\ V_{bi} \left(\frac{h-y}{b}\right)^{1/n_i} & \text{при } h_b \leq y \leq h, \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^2 B_i = 1; \quad B_1 = (B_{1m} - B_{w1}) f\left(\frac{y}{h}\right) + B_{w1}; \quad \tau_i = \rho_i \aleph h (V_{1x} - V_{w1}) \frac{\partial V_i}{\partial y}; \quad (i = 1, 2),$$

где $f_i\left(\frac{y}{h}\right)$ – профили $\bar{V}_{xi} = \frac{V_{xi}}{V_{1x}}$; $f\left(\frac{y}{h}\right)$ – профили $\bar{B}_1 = \frac{B_{1i}}{B_{1m}}$; C_i – концентрация каждой из

фаз в рассматриваемой зоне несущего слоя; p – давление в слое; \aleph – константа Кармана; индексы указывают на значения параметров: w – в граничном слое; b – на границе подобластей (толщина пристенной области); m – в подобласти, примыкающей к диску.

Система уравнений (8) решается численно с использованием метода Рунге-Кутты [10]. Уравнения (8) с использованием представлений в (9) позволяют установить изменения по x семи функциями: V_{wi} , V_{bi} , B_{m1} , B_{w1} , b при краевых условиях ($x = 0$) и определить распределения $B_i(x, y)$, $V_{xi}(x, y)$.

6. Кинематические параметры течения гетерогенного смазочного материала используются при уточнении сеточных функций распределения концентрации компонент смазочной композиции, по которым из уравнений Рейнольдса и энергии смазочного слоя рассчитывается следующее приближение для давлений и температур в слое.

7. Полученные распределения $B_i(x,y)$, $V_{xi}(x,y)$ позволяют определить распределение скоростей каждой из фаз и получить значение толщины дисперсной фазы обводненного смазочного материала вблизи вращающегося диска:

$$V_{yi} = -\frac{1}{yB_i} \int_0^y \frac{\partial}{\partial x} (yB_i V_{xi}) dy$$

8. Из следующего выражения рассчитывается расход смазочного материала в любой момент времени, определяющий среднюю скорость расхода по сечению канала:

$$Q(t) = \frac{4\pi d^2}{\rho l} \int_0^t \Delta P(\tau) F(r, t - \tau) d\tau,$$

где $F(r, t - \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-a_k v \frac{(t-\tau)}{d^2}}}{a_k^2}$ – функция распределения, a_k – корни функции Бесселя, d – диаметр канала:

$$V_0(t) = \frac{Q(t)}{\pi d} = \frac{4}{\rho l} \int_0^t \Delta P(\tau) F(r, t - \tau) d\tau.$$

Полученные параметры смазочного материала в напорной магистрали являются исходными данными для определения параметров обводненного смазочного материала в клиновидном зазоре радиального гидродинамического подшипника скольжения судового валопровода.

9. Полученные в ходе решения задач диффузии и массопереноса в гидравлическом тракте радиального ГДП распределения концентрации фаз, расходные характеристики индивидуальной системы смазки радиального гидродинамического подшипника судового валопровода являются исходными для установления сеточных функций распределения гидродинамических, кинематических и реологических параметров обводненного смазочного материала в клиновидном зазоре трибоузла. Используя результаты исследований, отображенные в работе [21], можно сделать вывод о том, что гетерогенный смазочный слой представляет собой двухфазную систему типа «модельная жидкость» – «газ», где физические свойства модельной жидкости можно принять соответствующими физическим свойствам дисперсионной среды с (или без) аддитивными поправками на эмульгированную фазу.

10. Используя численные методы и алгоритм решения уравнения (8), представленный в работе [10], определяются пространственные распределения кинематических и теплофизических характеристик двухфазной системы «модельная жидкость» – «газ», позволяющие с достаточной точностью рассчитать основные характеристики радиального гидродинамического подшипника.

Итерационный процесс повторяется до обеспечения требуемой сходимости полученного решения по условию $|p(x, z, t)^{(n+1)} - p(x, z, t)^{(n)}| \leq \varepsilon$, где ε – заданная точность.

11. Производится расчёт проекций сил давления, действующих на вал со стороны двухфазной системы «модельная жидкость» – «газ» в радиальных гидродинамических подшипниках на оси ζ и η аналогично, как и в задаче динамики судового валопровода при малой степени обводнения [18].

12. Определяются динамические характеристики двухфазной системы «модельная жидкость» – «газ» из выражений применительно к многофазному несущему слою:

$$F_{\xi} = \iint_{\Omega} p(x; z) \sin(x) d\Omega;$$
$$F_{\eta} = -\iint_{\Omega} p(x; z) \cos(x) d\Omega.$$

Подставляя полученные динамические характеристики смазочного слоя в представленную выше КЭ-модель судового валопровода, определяем траектории перемещения шипов в зазорах подшипников. Анализируются и обобщаются данные динамического анализа валопровода.

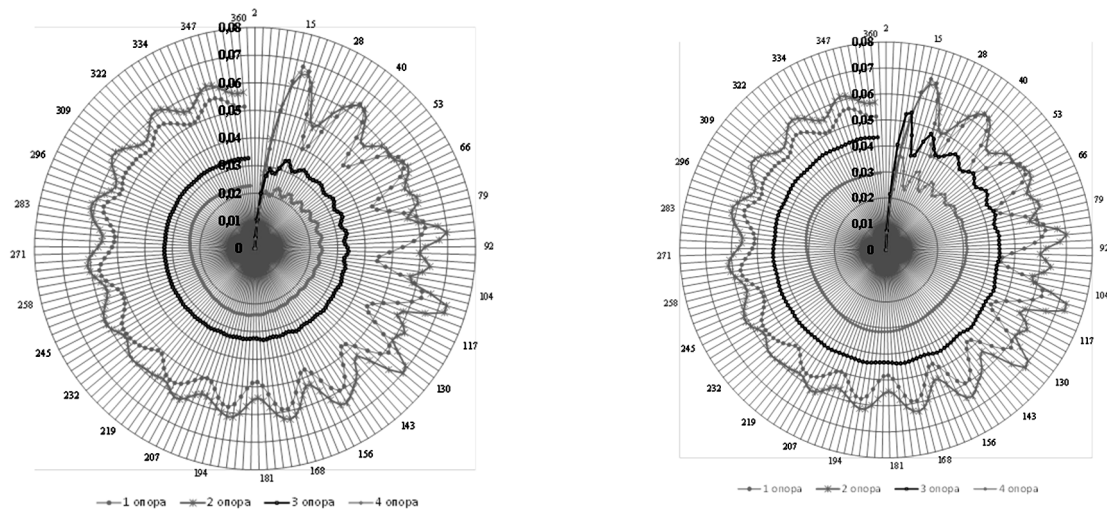
Результаты анализа устойчивости судового валопровода при поступлении воды в индивидуальную систему смазки РГП свидетельствуют об увеличении жесткости смазочного слоя при одновременном уменьшении его толщины. Как отмечено в статье [18], обводнение масла в пределах $k \leq 15\%$ даже в двух последовательно установленных опорах практически не изменяет характер пространственного движения судового валопровода. Дальнейшее увеличение водосодержания в смазочном слое приводит к более резкому отклику системы на возмущение (рис. 2). При обводнении смазочного масла $k \geq 15\%$ происходит дальнейший рост уровня водяного подслоя, приближающегося к вращающемуся диску, снижая расходные характеристики индивидуальной системы смазки трибузла. В результате, в клиновидный зазор РГП продолжает поступать эмульгированный смазочный материал. При этом, в клиновидном зазоре РГП происходит слияние водяных включений и, как следствие, разрушение ячеистых гексагональных структур эмульсии с выделением растворенной газовой фазы из смазочного материала и создающей предпосылки к переходу в капельный режим течения [17, 21]. Вследствии деструктирующего действия воды в клиновидном зазоре РГП происходит уменьшение толщины смазочного слоя с одновременным ростом жесткости тонкой масляной пленки. При этом, возникающие реакции в опорах судового валопровода приводят к изменению пространственного движения осей валов в его трибузлах.

Вышеуказанное подтверждает актуальность дальнейших исследований влияния реологии смазочной жидкости на упруго-демпфирующие свойства подшипников различных типов и, как следствие, устойчивость колебательного движения многоопорных валопроводов судовых энергетических установок.

Анализ соответствия результатов имитационных экспериментов заданным критериям качества достигаемых целей, произведенный с использованием данных экспериментов на физических моделях [10, 23, 24], показал, что суммарная погрешность от упрощений при постановке задачи, выбора исходных зависимостей и методов расчёта не превышает 6–9 %.

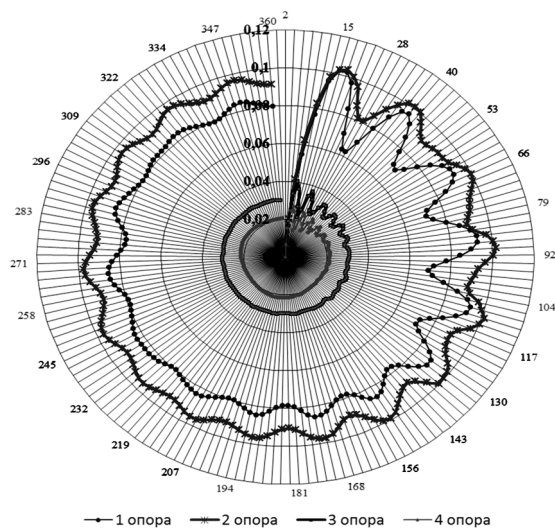
Выводы

1. Представленная методика динамического анализа судового валопровода при анизотропии смазочного материала, обусловленная наличием воды в смазочном масле, позволяет дополнить существующие методы анализа и расчетные алгоритмы динамики роторных систем уравнениями диффузии и массопереноса в гидравлическом тракте РГП с индивидуальной системой смазки.



Спецификационные условия работы валопровода

Обводнение смазки: опоры 1, 2 – $k = 30 \%$, опоры 3, 4 – $k = 15 \%$



Обводнение смазки: опоры 1, 2 – $k = 5 \%$, опоры 3, 4 – $k = 50 \%$

Рисунок 2 – Круговые диаграммы виброперемещений осей цапф по траекториям подвижного равновесия в опорах судового валопровода на номинальной частоте вращения, мм

2. Дальнейшее развитие методов анализа динамики судовых валопроводов целесообразно вести в направлении как усложнения КЭ-модели системы «валопровод – подшипники – набор корпуса судна» в целях максимального приближения её к реальным условиям, так и расчетных алгоритмов уравнений диффузии и массопереноса эмульгированного смазочного материала в гидравлическом тракте трибузла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин А. С. Динамика роторных машин / А. С. Гольдин. – М. : Машиностроение, 1999. – 344 с.
2. Савин Л. А. Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения : монография / Л. А. Савин, О. В. Соломин. – М. : Машиностроение, 2006. – 444 с.
3. Childs D. Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling and analysis / D. Childs. – New York : Wiley-Interscience, 1993. – 496 p.
4. Yamamoto T. Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications / T. Yamamoto, Y. Ishida. – New York : Wiley-Interscience, 2001. – 326 p.

5. Gasch R. Rotordynamik / R. Gasch, R. Nordmann, H. Pflutzner. – Berlin : Springer, 2005. – 699 s.

6. Романовский Г. Ф. Динамика упорных подшипников скольжения судовых турбомашин : монография / Г. Ф. Романовский, Н. Я. Хлопенко. – Николаев : Нац. ун-т кораблестроения им. адм. Макарова, 2007. – 140 с.

7. Сторожев В. П. Причини та закономірності поступових відмов основних триботехнічних об'єктів енергетичної системи судна і підвищення їх ресурсу : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.02.02 «Машинознавство» / В. П. Сторожев. – Хмельницький, 2002. – 39 с.

8. Родин П. Т. Регулирование колебаний валопроводов судовых дизельных установок: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.08.05 «Судовые энергетические установки» / П. Т. Родин. – Одесса, 1993. – 34 с.

9. Гаращенко П. А. Повышение работоспособности судовых валопроводов методами оптимизации и стабилизации параметров центровки: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.08.05 «Судовые энергетические установки» / П. А. Гаращенко. – Астрахань, 2000. – 37 с.

10. Кирюхін О. Л. Удосконалення функціональних властивостей систем утримання та стабілізації валопроводів суднових турбінних установок: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» / О. Л. Кирюхін. – Одеса, 2011. – 38 с.

11. Лубенко В. Н. Монтаж судовых валопроводов / В. Н. Лубенко, Ю. А. Вязовой. – СПб. : Судостроение, 2007. – 400 с.

12. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran / С. П. Рычков. – М. : ДМК Пресс, 2013. – 784 с.

13. Майоров С. В. Параметрические колебания роторов на радиальных подшипниках жидкостного трения : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 01.02.06 / С. В. Майоров. – Орел, 2009. – 20 с.

14. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. Т. 1-3. В 2 кн. Кн. 2 : [Машиностроение : энциклопедия] / под ред. К. С. Колесникова. – М. : Машиностроение, 1995. – 624 с.

15. Истомин П. А. Крутильные колебания в судовых ДВС / П. А. Истомин. – Л. : Судостроение, 1968. – 303 с.

16. Румб В. К. Основы проектирования и расчета судового валопровода : учеб. пособие / В. К. Румб. – СПб. : Из-во МТУ, 2000. – 106 с.

17. Підвищення ефективності використання опорних підшипників корабельних валопроводів: звіт про НДР (заключн.) / [А. Л. Кирюхин, В. В. Сапи́га, Ю. М. Воробйов та інш.] / СВМІ ім. П. С. Нахімова. – ТО-202-С-761. – Севастополь, 2006. – 231 с.

18. Сапи́га В. В. Совершенствование методов анализа динамики судовых валопроводов / В. В. Сапи́га, А. Л. Кирюхин, П. В. Черпита // Сб. научн. тр. – К. : КГАВТ, 2014. – Вып. 1 (19). – С. 52–61.

19. Сапи́га В. В. Диффузия и массоперенос в системах индивидуальной смазки подшипников корабельных валопроводов на обводненном масле (часть 1) / В. В. Сапи́га, А. Л. Кирюхин, Г. Ф. Романовский, М. С. Агеев // Сб. научн. тр. АВМС им. П.С. Нахимова. – Севастополь, 2011. – Вып. 3 (7). – С. 148–157.

20. Сапи́га В. В. Диффузия и массоперенос в системах индивидуальной смазки подшипников корабельных валопроводов на обводненном масле (часть 2) / В. В. Сапи́га, А. Л. Кирюхин, В. В. Ажимов // Сб. научн. тр. АВМС им. П.С. Нахимова. – Севастополь, 2012. – Вып. 2 (10). – С. 171–178.

21. Сапи́га В. В. Эволюция структур обводненного смазочного материала в клиновидном зазоре радиального подшипника скольжения с индивидуальной системой смазки / В. В. Сапи́га // Сб. научн. тр. – Киев : КГАВТ, 2012. – Вып. 1 (13). – С. 97–103.

22. Дьячков А. К. Развитие гидродинамической теории смазки применительно к задачам современного машиностроения / А. К. Дьячков // Трение и износ. – 1981. – Т. 11, № 2. – С. 197–211.

23. Кирюхин А. Л. Экспериментальный стенд для исследования устойчивости жидкостного режима трения в подшипниках / А. Л. Кирюхин, В. В. Сапига, М. В. Слободянюк // Сб. научн. тр. СВМИ. – Севастополь, 2007. – Вып. 1(11). – С. 198–204.

24. Романовский Г. Ф. Термогидродинамический расчёт радиальных подшипников скольжения судовых пропульсивных комплексов в неспецификационных эксплуатационных условиях / Г. Ф. Романовский, А. Л. Кирюхин, Ю. М. Воробьев // Проблемы трибологии (Problems of tribology). – 2009. – № 3 (53). – С. 62–71.

REFERENCES

1. Goldin A. S. *Dinamika rotornykh mashin*. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1999. – 344 p. (in Russian).

2. Savin L. A., Solomin O. V. *Modelirovanie rotornykh sistem s podshipnikami zhidkostnogo treniia* [Modeling of rotary systems with fluid bearings]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 2006. – 444 p. (in Russian).

3. Childs D. *Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling and analysis*. New York : Wiley-Interscience, 1993. – 496 p.

4. Yamamoto T., Ishida Y. *Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications*. New York : Wiley-Interscience, 2001. – 326 p.

5. Gasch R., Nordmann R., Pflutzner H. *Rotordynamik*. Berlin : Springer, 2005. – 699 p.

6. Romanovskii G. F., Khlopenko N. Ia. *Dinamika upornykh podshipnikov skolzheniia sudovykh turbomashin*. Publishing house of the National University of Shipbuilding (NUS), Mykolayiv, 2007. – 140 p. (in Russian).

7. Storozhev V. P. *Prychyny ta zakonomirnosti postupovykh vidmov osnovnykh trybo-tekhnichnykh ob'ektiv enerhetychnoi systemy sudna i pidvyshchennia yikh resursu*. Extended abstract of Doctor of Technical Sciences (Mashynoznavstvo). Khmelnytskyi natsionalnyi universytet, Khmelnytskyi, 2002. – 39 p. (in Ukrainian).

8. Rodin P. T. *Regulirovanie kolebaniy valoprovodov sudovykh dizelnykh ustanovok*. Extended abstract of Doctor of Technical Sciences (Ship power plants). Odessa Maritime Academy, Odessa, 1993. – 34 p. (in Russian).

9. Garashchenko P. A. *Povyshenie rabotosposobnosti sudovykh valoprovodov metodami optimizatsii i stabilizatsii parametrov tcentrovki*. Extended abstract of Doctor of Technical Sciences (Ship power plants). Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 2000. – 37 p. (in Russian).

10. Kiryuhin A. L. *The perfection of functional properties of the shafts' holding and stabilizing systems of the ship turbine plants*. Extended abstract of Doctor of Technical Sciences (Engines and power plants). Odessa National Maritime Academy, Odessa, 2011. – 38 p. (in Ukrainian).

11. Lubenko V. N., Viazovoi Iu. *A Montazh sudovykh valoprovodov*. St. Petersburg. Sudostroenie Publ., 2007. – 400 p. (in Russian).

12. Rychkov S. P. *Modelirovanie konstruktsii v srede Femap with NX Nastran*. Moscow. DMK Press Publ., 2013. – 784 p. (in Russian).

13. Maiorov S. V. *Parametricheskie kolebaniia rotorov na radialnykh podshipnikakh zhidkostnogo treniia*. Extended abstract of PhD dissertation (Dynamics, strength of machines, instruments and equipment). Orel State Technical University, Orel, 2009. – 20 p. (in Russian).

14. Kolesnikov K. S. *Dinamika i prochnost mashin. Teoriia mekhanizmov i mashin*. Vol. 1-3. In 2 books. Book 2 : [Mechanical engineering: encyclopedia]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1995. – 624 p. (in Russian).

15. Istomin P. A. *Krutilnye kolebaniia v sudovykh DVS*. Leningrad. Sudostroenie Publ., 1968. – 303 p. (in Russian).
16. Rumb V. K. *Osnovy proektirovaniia i rascheta sudovogo valoprovoda*. St. Petersburg. Publishing house of the Maritime Technical University, 2000. – 106 p. (in Russian).
17. Kiryuhin A.L., Sapiha V.V., Vorobiov Iu.M. *Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia opornykh pidshypnykiv korabelnykh valoprovodiv* [Scientific research work. Report]. The Sevastopol Naval Institute, Sevastopol, 2006. – 231 p. (in Ukrainian).
18. Sapiga V.V., Kiryuhin A.L., Cherpita P.V. *Improvement of methods for analyzing the dynamics of ship shaft lines*. *Bulletin of Kyiv State Maritime Academy*, Kiev, 2014, no. 1(19), pp. 52-61. (in Russian).
19. Sapiga V.V., Kiryuhin A.L., Romanovskii G.F., Ageev M.S. *Diffusion and mass transfer in systems of individual lubrication of bearings of ship shaft lines on water-saturated oil (Part 1)*. *Bulletin of Academy of the Navy*, Sevastopol, 2011, no. 3(7), pp. 148–157. (in Russian).
20. Sapiga V.V., Kiryuhin A.L., Azhimov V.V. *Diffusion and mass transfer in systems of individual lubrication of bearings of ship shaft lines on water-saturated oil (Part 2)*. *Bulletin of Academy of the Navy*, Sevastopol, 2012, no. 2(10), pp. 171–178. (in Russian).
21. Sapiga V.V. *Evolution of water-saturated oil structures in the wedge gap of a radial slide bearing with an individual lubrication system*. *Bulletin of Kyiv State Maritime Academy*, Kiev, 2012, no. 1(13), pp. 97-103. (in Russian).
22. Diachkov A. K. *Razvitie gidrodinamicheskoi teorii smazki primenitelno k zadacham sovremennogo mashinostroeniia*. *Friction and wear*, 1981, Vol. 11, no. 2, pp. 197–211. (in Russian).
23. Kiryuhin A.L., Sapiga V.V., Slobodianiuk N.V. *Experimental stand for the study of the stability of the liquid friction regime in bearings*. *Bulletin of the Sevastopol Naval Institute*, Sevastopol, 2007, no. 1(11), pp. 198-204. (in Russian).
24. Romanovskii G.F., Kiryuhin A.L., Vorobiov Iu.M. *Thermohydrodynamic calculation of radial bearings of slip ship propulsion complexes in non-specification operating conditions*. *Problems of tribology*, 2009, no. 3 (53), pp. 62–71. (in Russian).

Сапіга В. В., Єрмошкін М. Г., Ігнатенко О. А. МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СУДНОВОГО ВАЛО-ПРОВОДУ ПРИ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАННЯХ Й ОБВОДНЮВАННІ МАСЛА В ОПОРНИХ ПІДШИПНИКАХ

Метою роботи є вдосконалення методів аналізу динаміки суднових валопроводів з гідродинамічними підшипниками. Методологія. Синтез методів динамічного аналізу роторних систем з підшипниками рідинного тертя, що враховують зміни пружно-демпфуючих властивостей несучого шару проводиться в два етапи. На першому етапі рішення завдання, динаміки суднового валопроводу полягало у визначенні неконсервативних сил в несучому шарі, що є відгуком на зовнішні змінні гармонічні навантаження. На другому етапі вирішувалося завдання, динаміки суднового валопроводу, в умовах анізотропії несучого шару, викликаного процесами дифузії та масоперенесенням у гідравлічному тракті підшипника. Результати. Проведено моделювання поведень роторної системи на основі створеної кінцево-елементної моделі суднового валопроводу морського траулера. Отримано кругові діаграми вібропереміщень осей цапф по траєкторіям рухомої рівноваги в опорах суднового валопроводу при різній ступеня обводнення мастила. Новизна. Отримала подальший розвиток методика проведення динамічного аналізу роторних систем, що враховує процеси дифузії і масоперенесення обведеного масла в гідравлічному тракті радіального гідродинамічного підшипника. Практичне значення. Отримані параметри вібропереміщень осей цапф по траєкторіям рухомої рівноваги в опорах суднового валопроводу дозволяють доповнити існуючі системи моніторингу технічного стану, а також дає можливість створення алгоритмів дії оператора в екстремальних умовах експлуатації.

Ключові слова: судновий валопровід, радіальний гідродинамічний підшипник, вібрація, моделювання.

Sapiha V. V., Ermoshkin N. G., Ignatenko A. A. MODELING BEHAVIOR OF SHIP SHAFTING AT TRANSVERSE VIBRATIONS AND IN FLOODING THE LUBRICANT SUPPORT BEARINGS

Purpose. The aim of the work is to improve the methods of analyzing the dynamics of ship shaft-wires with hydrodynamic bearings. **Methodology.** Synthesis methods for dynamic analysis of rotor systems with liquid friction bearings that take into account the change in the elastic-damping properties of the carrier layer was carried out in two stages. At the first stage, solution of the problem of ship shafting dynamics, consisted in determining non-conservative forces in the carrier layer, which are a response to the external variable harmonic load. At the second stage, the problem was solved, the dynamics of the ship shafting, under conditions of anisotropy of the carrier layer caused by diffusion and mass transfer processes in the hydraulic bearing path. **Results.** Modeling of the behavior of the rotary system based on the created finite element model of the ship shafting of the sea trawler is carried out. Circular diagrams of vibro-displacement of axes of shafts along the trajectories of mobile balance in the supports of the ship shaft line are obtained for different degrees on water-saturated of lubricating oil. **Originality.** The technique of dynamic analysis of rotor systems, taking into account the processes of diffusion and mass transfer of the water-saturated oil in the hydraulic path of the radial hydrodynamic bearing, has been further developed. **Practical value.** The obtained parameters of the vibration displacement of the axles of the shafting along the trajectories of the mobile equilibrium in the supports of the ship shafting line allow the complement existing monitoring systems of the technical state and also gives the chance to develop algorithms of action of the operator in extreme conditions of operation.

Keywords: ship shafting, radial hydrodynamic bearing, vibration, modeling.

© Сапіга В. В., Ермошкін М. Г., Ігнатенко О. А.

Статтю прийнято
до редакції 2.06.17

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ ПАРААМІНОАЗОБЕНЗОЛОМ ЕПОКСИДНИХ МАТРИЦЬ ДЛЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ

Ходаковський О. В., к.т.н., доцент кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: dzgeron@rambler.ru;

Амелін М. Ю., аспірант кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: dzgeron@rambler.ru;

Букетова Н. М., к.т.н., науковий співробітник наукової групи при кафедрі транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua;

Яцюк В. М., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua

На основі проведених випробувань теплофізичних властивостей епоксикомпозитів, наповнених модифікатором парааміноазобензолом, з використанням сучасних методів дослідження встановлено допустимі межі температури, при яких можливо використовувати розроблені матеріали. Досліджено термічний коефіцієнт лінійного розширення (α), теплостійкість (T) та термостійкість епоксикомпозитів. Встановлено абсолютні значення термічного коефіцієнта лінійного розширення матеріалів, які можливо використовувати у різних температурних діапазонах. Методом диференціально-термічного й термогравіметричного аналізу проведено дослідження термостійкості і структурних особливостей матеріалів при зростанні температури. Встановлено, що для формування композитних матеріалів з підвищеними показниками теплофізичних властивостей, доцільно використовувати модифікатор у кількості $q = 1,0$ мас.ч. Такий матеріал характеризуються найбільшою енергією активації, стійкістю до структурних перетворень при максимальних температурах та інтенсивною взаємодією функціональних груп наповнювача та епоксидного олігомеру під час структуроутворення на молекулярному рівні серед усіх досліджуваних матеріалів.

Ключові слова: епоксидний композит, теплостійкість, термостійкість, деструкція, екзоэффект.

Постановка проблеми. Розвиток транспортних технологій на сучасному етапі ставить умови покращення не лише логістики міжнародних перевезень, але й розроблення нових матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками для підвищення надійності засобів транспорту. У цьому плані перспективним є використання нових матеріалів на полімерній основі, які відзначаються поліпшеними антикорозійними властивостями і зносостійкістю. Однак, відомо [1, 2], що для поліпшення властивостей полімерів, у тому числі й на епоксидній основі, у зв'язувач вводять модифікатори, пластифікатори, наповнювачі. Слід зазначити, що перспективним є введення модифікаторів, позаяк такі добавки за незначного вмісту (1...5 %) дозволяють суттєво підвищити показники адгезійної і когезійної міцності компаундів. Останні, у свою чергу, доцільно використовувати у вигляді матриць для захисних покриттів робочих деталей, у тому числі й під час їх ремонту в умовах рейсу суден морського та річкового транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [3–5] доведено й обґрунтовано важливість використання модифікаторів за незначних концентрацій у епоксидній матриці для поліпшення їх когезійних властивостей. При цьому важливим є вибір модифікатора, який містить активні до фізичної і хімічної взаємодії з епоксидним олігомером гідроксильні, карбонільні, нітрильні та інші групи. Додатково показано, що актуальним є встановлення критичного вмісту добавки у полімері, оскільки надлишкова його кількість призводить до збільшення золь-фракції у матеріалах, що призводить до погіршення їх когезійної міцності.

У цьому контексті цікавим є використання як модифікатора парааміноазобензолу. Попередньо доведено [6], що введення даної добавки приводить до суттєвого підвищення показників адгезійної міцності епоксидних композитів. Враховуючи, що розроблені

матеріали можна досить ефективно використовувати для захисту устаткування, яке експлуатують за підвищених температур, вважали за доцільне провести дослідження стосовно визначення впливу природи і вмісту модифікатора парааміноазобензолу на теплофізичні властивості епоксидної матриці.

Мета роботи – дослідити вплив вмісту модифікатора парааміноазобензолу на теплофізичні 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 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 [1], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як модифікатор використано парааміноазобензол (ПААБ). Хімічна формула парааміноазобензолу має наступний вигляд: $C_{12}H_{11}N_3$. Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас.ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна маса парааміноазобензолу – 197. Температура плавлення – 400 К. Модифікатор розчинний у бензолі, етанолі, ацетоні, малорозчинний у воді. Використовується як азобарвник та синтон для одержання більш складних азобарвників.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР), теплостійкість (T), термостійкість (ДТА і ТГА-аналіз).

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно з ГОСТ 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваний зразок нагрівали зі швидкістю $v = 3$ К/хв під дією постійного згинаючого навантаження $F = 5 \pm 0,5$ МПа, внаслідок чого він деформується на задану величину ($h = 6$ мм).

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури, апроксимуючи цю залежність експоненціальною функцією. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури у стаціонарних умовах (ГОСТ 15173-70). Розміри зразків для дослідження: $65 \times 7 \times 7$ мм, непаралельність шліфованих торців складала не більше 0,02 мм. Перед дослідженням вимірювали довжину зразка з точністю $\pm 0,01$ мм. Швидкість підняття температури становила $v = 2$ К/хв.

Відхилення значень при дослідженні показників теплофізичних властивостей КМ (теплостійкість (за Мартенсом), ТКЛР) становило 4...6 % від номінального.

Для дослідження впливу кількості наповнювача на термічні перетворення у композитах застосовували метод термогравіметричного (ТГА) і диференціально-термічного (ДТА) аналізу, використовуючи дериватограф «Thermoscan-2». Дослідження проводили у температурному діапазоні $\Delta T = 298...873$ К, використовуючи кварцові тиглі для зразків об'ємом $V = 0,5$ см³. Під час дослідження швидкість підняття температури становила $v = 10$ К/хв, при цьому як еталонну речовину використовували Al_2O_3 ($m = 0,5$ г), наважка досліджуваного зразка становила – $m = 0,3$ г. Похибка визначення температури становила $\Delta T = \pm 1$ К. Точність визначення теплових ефектів – 3 Дж/г. Точність визначення зміни маси зразка – $\Delta m = 0,001$ г.

Результати досліджень та їх обговорення. Для аналізу механізму впливу модифікатора на характеристики матриці, а також з метою встановлення його критичного вмісту у композитному матеріалі (КМ) досліджували комплекс властивостей матеріалів. Зокрема, теплостійкість, ТКЛР, термостійкість та їх похідні характеристики. Вважали, що

лише комплексний підхід до встановлення оптимальної концентрації добавки дозволить опосередковано дослідити перебіг процесів структуроутворення композитів і, як наслідок, спрогнозувати поведінку матеріалів в умовах експлуатації у виробничих умовах.

На початковому етапі досліджували теплостійкість матриці, що є однією з визначальних характеристик композитів при їх експлуатації в умовах підвищених температур. Попередньо встановлено (рис. 1), що теплостійкість вихідної (немодифікованої), однак, обробленої ультразвуком епоксидної матриці, становить $T = 341$ К. Введення модифікатора у зв'язувач, навіть за незначної кількості ($q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч.) приводить до суттєвого підвищення теплостійкості КМ, позаяк її показники зростають від $T = 341$ К до $T = 345 \dots 358$ К. Максимум на кривій залежності $q - T$ спостерігали при вмісті добавки у КМ у кількості $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. Для таких композитів теплостійкість (за Мартенсом) становить $T = 360 \dots 362$ К. Експериментально доведено (рис. 1, крива 1), що збільшення вмісту модифікатора (понад $q = 1,00$ мас.ч.) призводить до суттєвого погіршення теплостійкості КМ. Отримані результати дослідження можна пояснити наступним. За відносно незначного вмісту добавки ($q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч.) відбувається інтенсифікація процесів структуроутворення КМ, що передбачає підвищення їх когезійної міцності і, як наслідок, теплостійкості. Однак кількість модифікатора не є достатньою для формування міцнозшитої тривимірної структурної сітки матриці. Водночас, введення ПААБ за критичного вмісту ($q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч.) забезпечує отримання матриці з максимальними значеннями теплостійкості.

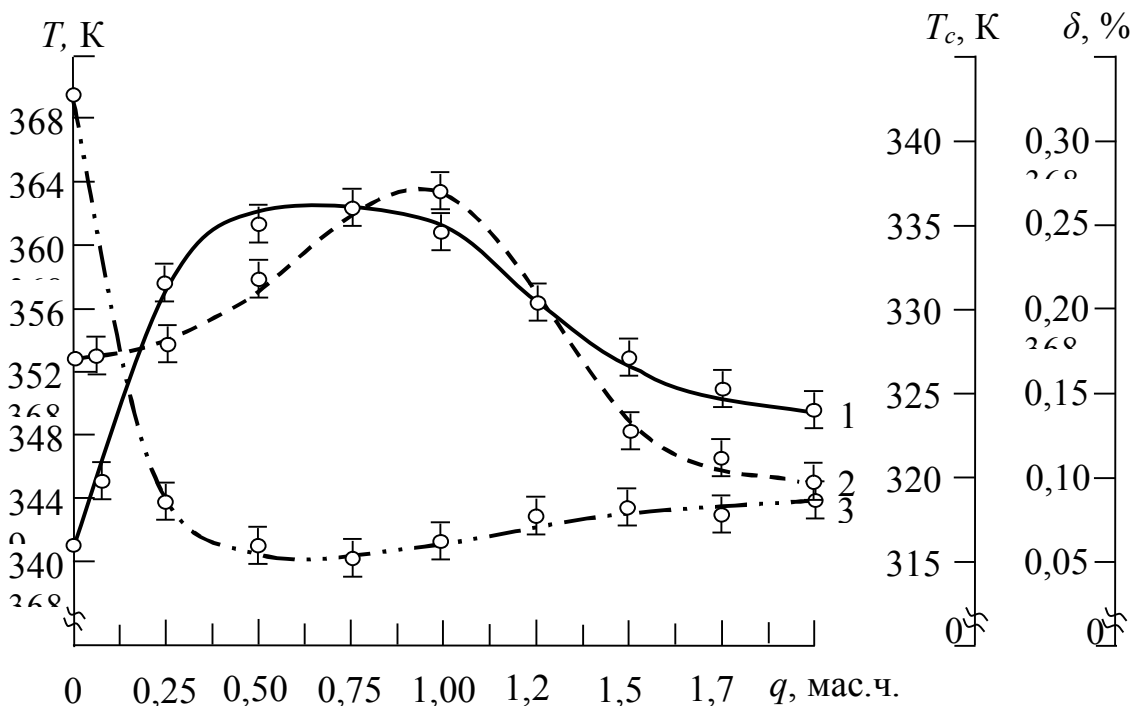


Рисунок 1 – Залежність теплофізичних властивостей епоксидної матриці від вмісту модифікатора парааміноазобензолу: 1 – теплостійкість (за Мартенсом) (T); 2 – температура склування (T_c); 3 – усадка (δ)

Вважали, що у цьому випадку формується КМ з рівномірно розподіленою структурою, яка характеризується значною кількістю хімічних зв'язків за об'ємом. Надалі збільшення кількості модифікатора (понад $q = 1,00$ мас.ч.) призводить до перенасичення системи добавкою. Це, у свою чергу, призводить до збільшення міжмолекулярного розподілу у об'ємі композиції. Тобто, молекули модифікатора не є зшитими, що

обумовлює збільшення вільного об'єму у структурній сітці епоксидної матриці. А це відповідно спричиняє зменшення теплостійкості розроблених КМ.

Отримані результати випробувань теплостійкості (за Мартенсом) порівнювали з результатами дослідження температури склування і усадки розроблених КМ. Доведено (рис. 1, крива 2), що температура склування зростає зі збільшенням кількості модифікатора до його критичної концентрації у епоксидній матриці. При цьому показники зростають від $T_c = 327$ К (для вихідної епоксидної матриці) до $T_c = 330...335$ К. Надалі збільшення вмісту добавки призводить до суттєвого погіршення теплофізичних властивостей КМ, позаяк показники температури склування знижуються до $T_c = 320...323$ К, що є меншим від показників вихідної матриці.

Дослідженням усадки підтверджено результати наведених вище випробувань. Показано (рис. 1, крива 3), що усадка вихідної матриці (при дослідженні у діапазоні температур $\Delta T = 303...473$ К) становить $\delta = 0,32$ %. Введення модифікатора приводить до зменшення усадки КМ до значень $\delta = 0,05...0,10$ %. Тобто, наявність добавки незалежно від її вмісту забезпечує суттєве зменшення усадки, що свідчить про суттєвий вплив модифікатора ПААБ на формування структурної сітки компаундів. А це відповідно поліпшує теплофізичні властивості розроблених матеріалів.

На наступному етапі досліджували ТКЛР вихідної і модифікованих епоксидних матриць. Експериментально встановлено (табл. 1), що у діапазоні температур $\Delta T = 303...323$ К введення модифікатора забезпечує зниження ТКЛР у 2,1...3,2 рази (від $\alpha = 6,30 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ для вихідної епоксидної матриці до $\alpha = (1,96...2,96) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ для модифікованих матриць). Цікавим з наукової і практичної точки зору є аналіз діапазону температур, який охоплює область склування полімерних композитів. Показано (табл. 1), що у діапазоні температур $\Delta T = 303...423$ К ТКЛР модифікованих матеріалів також є значно меншим порівняно з вихідною матрицею (ТКЛР зменшується від $\alpha = 9,92 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ для вихідної епоксидної матриці до $\alpha = (4,29...5,25) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ для модифікованих матриць). На кінцевому етапі дослідження у діапазоні температур $\Delta T = 303...473$ К різниця ТКЛР між вихідною і модифікованими матрицями є вже не такою суттєвою ($\Delta\alpha = (0,6...0,9) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Це свідчить про те, що розроблені матеріали можна експлуатувати у діапазоні температур $\Delta T = 303...473$ К, оскільки під впливом теплового поля відбувається не лише руйнування фізичних зв'язків у структурній сітці розроблених КМ, але й збільшується рухливість сегментів та бокових груп макромолекул. А це призводить до погіршення когезійних властивостей макросистем, що позначається на показниках їх теплофізичних характеристик. Крім того, слід зазначити, що найменшими показниками ТКЛР серед усього спектру досліджуваних діапазонів температур відзначаються матеріали, які містять модифікатор у кількості $q = 1,00$ мас.ч. Зокрема доведено (табл. 1), що для контрольних діапазонів впливу теплового поля (у області склування КМ – $\Delta T = 303...423$ К і критичних температур – $\Delta T = 303...473$ К) КМ, які містять модифікатор за даної концентрації, відрізняються у 1,2...2,3 рази меншими значеннями ТКЛР, порівняно з вихідною епоксидною матрицею (ТКЛР зменшується від $\alpha = 9,92 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ до $\alpha = 4,29 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ та від $\alpha = 10,91 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ до $\alpha = 8,95 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ відповідно). Отже, можна констатувати, що введення модифікатора ПААБ у епоксидний зв'язувач за такого вмісту дозволяє сформувати КМ, який дозволяє забезпечити стійкість розроблених матеріалів до лінійних та об'ємних деформацій у процесі експлуатації.

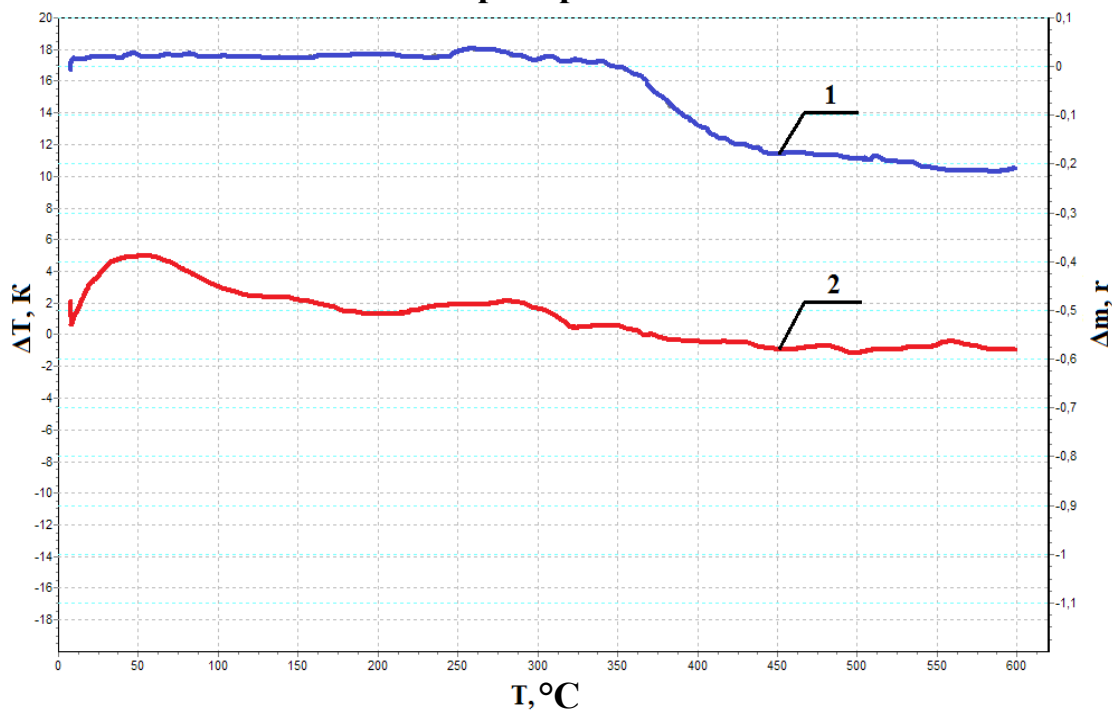
У роботі додатково досліджували й аналізували поведінку епоксидних композитів за підвищених температур (термостійкість) методом термогравіметричного (ТГА) та диференційно-термічного (ДТА) аналізу (рис. 2). Встановлено (табл. 2), що початкова температура деструкції, яка є визначальним фактором у процесі експлуатації розроблених матеріалів, для вихідної матриці є найнижчою ($T_0 = 600$ К) серед усіх досліджуваних зразків (виняток становить лише модифікована ПААБ матриця ($T_0 = 589$ К), яка містить $q = 1,5$ мас.ч. добавки. Максимальним значенням температури початку деструкції характеризується КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 1,0$ мас.ч., яка становить

$T_0 = 628 \text{ K}$, що на $\Delta T = 28 \text{ K}$ більше порівняно з аналогічним показником для зразка з епоксидної матриці. При цьому значення втрати маси становить $\varepsilon_m = 66,6 \%$, що є найменшим значенням серед досліджуваних КМ (для вихідної матриці даний показник становить $\varepsilon_m = 73,3 \%$). Це свідчить про підвищену стійкість модифікованого матеріалу до впливу температурного поля. Крім того, релаксація залишкових напружень за підвищених температур і самоорганізація структури тривимірної сітки в процесі перебігу термодинамічних процесів забезпечує підвищення стійкості КМ з оптимальним вмістом добавки в критичних умовах експлуатації.

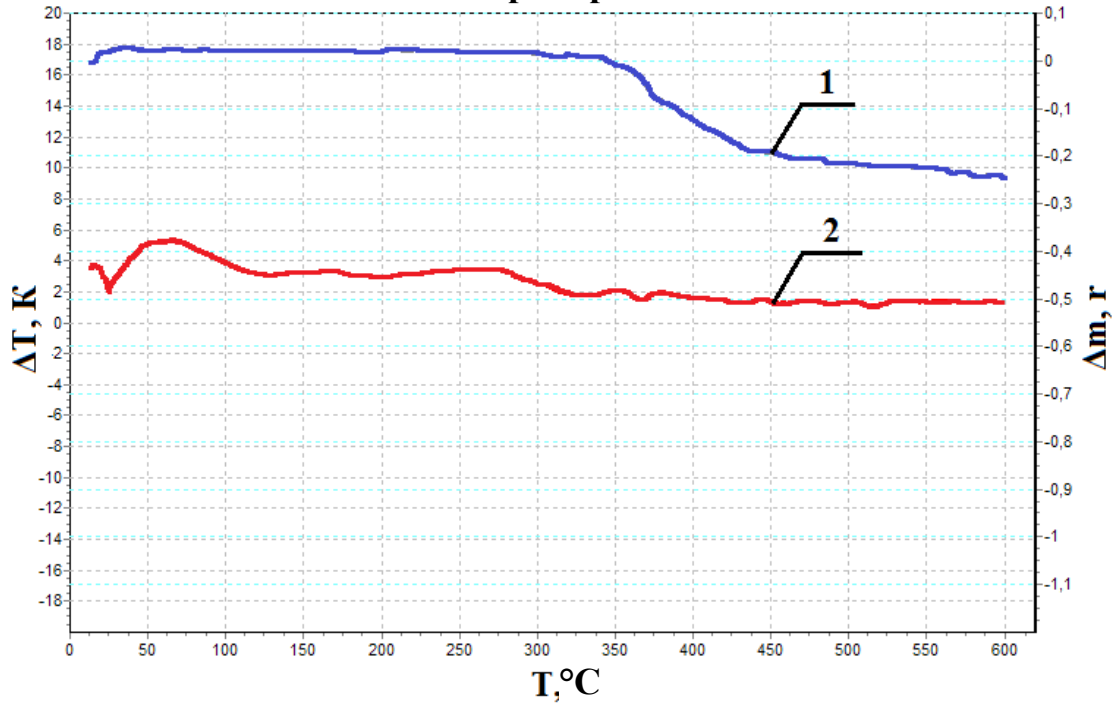
Таблиця 1 – Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) КМ при різних температурних діапазонах дослідження

№	Вміст модифікатора ПААБ, q, мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}, \text{K}^{-1}$			
		Температурні діапазони дослідження, $\Delta T, \text{K}$			
		303...323	303...373	303...423	303...473
1	–	6,30	6,81	9,92	10,91
2	0,25	2,79	3,25	4,29	10,02
3	0,50	2,96	3,21	4,54	10,08
4	1,00	1,96	1,40	4,29	8,95
5	1,50	2,75	3,71	5,25	10,26

Термограма

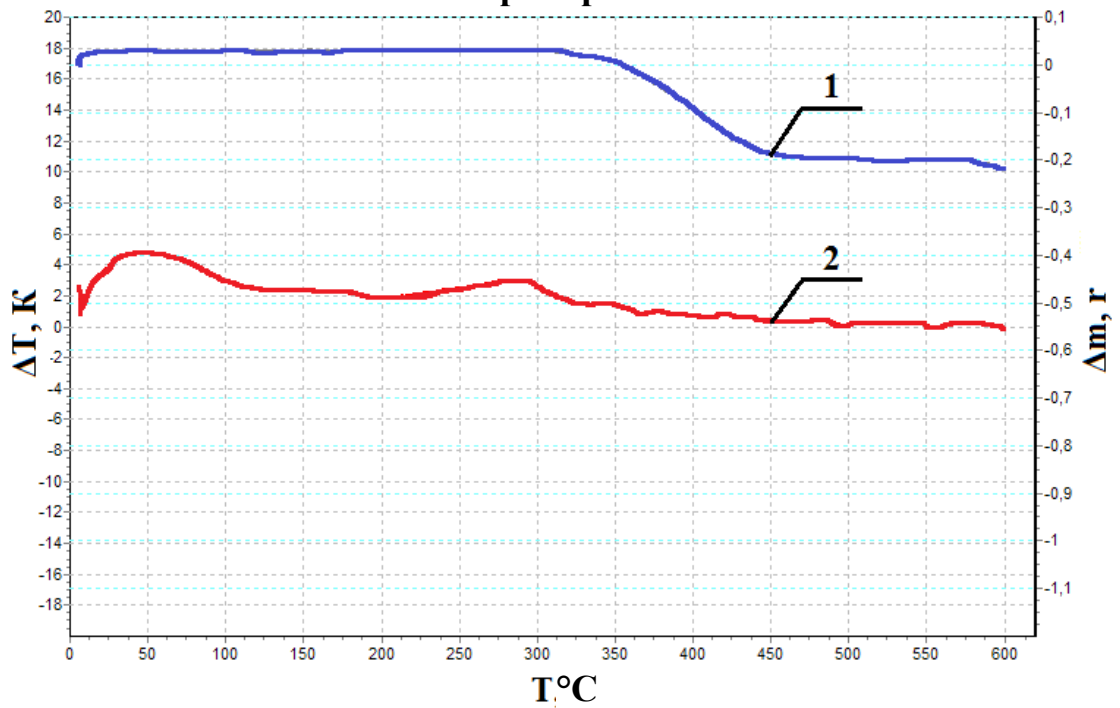


Термограма



б)

Термограма



в)

Термограма

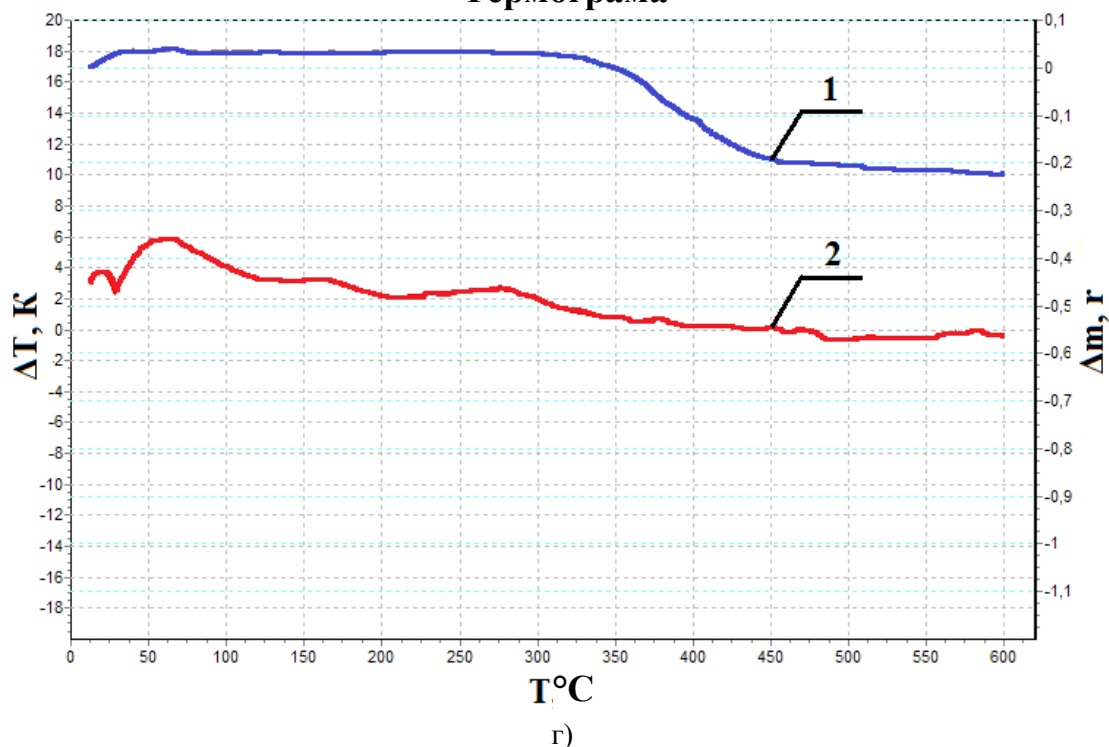


Рисунок 2 – Дериватограми модифікованих парааміноазобензолом епоксидних матриць:
 а) $q = 0,25$ мас.ч. модифікатора; б) $q = 0,50$ мас.ч. модифікатора; в) $q = 1,00$ мас.ч. модифікатора;
 г) $q = 1,50$ мас.ч. модифікатора

Таблиця 2 – Термостійкість модифікованих ПААБ КМ

Вміст модифікатора ПААБ, q , мас.ч.	T_0 , K	T_5 , K	T_{10} , K	T_{20} , K	T_k , K	ϵ_m , %
–	600	619	626	645	734	73,3
0,25	617	631	639	648	714	68,6
0,50	616	629	636	644	810	74,6
1,00	628	629	636	644	824	66,6
1,50	589	617	629	641	843	80,0

Примітка: T_0 – початкова температура втрати маси (початок деструкції); T_5 , T_{10} , T_{20} – температури втрати маси (5 %, 10 %, 20 %); T_k – кінцева температура втрати маси (завершення деструкції); ϵ_m – відносна втрата маси.

Одним із визначальних параметрів при експлуатації розроблених матеріалів є значення екзотермічних ефектів (T_n , T_{max}), які характеризують початок деформації та структурні перетворення в основних ланцюгах макромолекул епоксидної матриці (табл. 3). Аналіз ДТА-кривих КМ дозволив виявити екзотермічні ефекти у діапазоні температур $\Delta T = 520 \dots 620$ K (табл. 3). Встановлено, що максимальне значення екзоэффекту $T_{max} = 558$ K характерне для КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 1,0$ мас.ч. Зміщення піку екзотермічного ефекту в область високих температур зумовлене стійкістю фізико-хімічних зв'язків до руйнування, а, отже, такі матеріали відзначаються поліпшеною термостійкістю. Також зменшення інтервалу екзоэффекту від $\Delta T_I = 85$ K (для епоксидної матриці) до $\Delta T_I = 352$ K свідчить про зменшення рухливості і деформації компонентів епоксидного зв'язувача.

Таблиця 3 – Температурні інтервали екзофектів КМ згідно з ДТА

Вміст модифікатора ПААБ, q , мас.ч.	Температурні інтервали екзофектів				Максимальне значення екзофектів, T_{max} , К
	T_n , К	T_k , К	ΔT_1 , К	ΔT_2 , К	
–	598	683	85	2	618
0,25	479	655	176	2	553
0,50	515	685	169	2	539
1,00	509	861	352	2	558
1,50	486	753	267	3	547

Примітка: T_n – початкова температура екзофекту; T_k – кінцева температура екзофекту; ΔT_1 – температурний інтервал екзофекту; ΔT_2 – різниця температур між зразком, у якому відбуваються перетворення, і еталоном, у якому перетворень немає.

Якісна комплексна оцінка дериватограм дозволяє стверджувати, що КМ, наповнені модифікатором ПААБ у кількості $q = 1,0$ мас.ч., характеризуються поліпшеними теплофізичними властивостями. У цілому можна припустити, що встановлений механізм взаємодії функціональних груп наповнювача та епоксидного олігомеру під час структуроутворення матеріалів на молекулярному рівні забезпечує поліпшення теплофізичних властивостей матриці на макрорівні. Це свідчить про значне підвищення термостабільності КМ та формування систем без суттєвого підвищення стабільності хімічних зв'язків порівняно із епоксидною матрицею.

Висновки. На основі проведених випробувань теплофізичних властивостей з використанням сучасних методів дослідження встановлено допустимі межі температури, при яких можливо використовувати модифіковані парааміноазобензолом епоксидні композити. Крім того, встановлено:

1. Для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліпшеними теплофізичними властивостями у епоксидний зв'язувач доцільно вводити модифікатор парааміноазобензол у кількості $q = 1,0$ мас.ч. на $q = 100$ мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Формування такого матеріалу дозволяє підвищити теплостійкість (за Мартенсом) порівняно з вихідною (немодифікованою) епоксидною матрицею від $T = 341$ К до $T = 362$ К, температуру склування від $T_c = 327$ К до $T_c = 335$ К, а усадка у діапазоні температур $\Delta T = 303 \dots 473$ К при цьому зменшується від $\delta = 0,32$ % до $\delta = 0,08$ %. Вважали, що введення у епоксидний олігомер модифікатора за критичного вмісту забезпечує формування матеріалу з рівномірно розподіленою структурою, яка характеризується значною кількістю хімічних зв'язків за об'ємом.

2. Експериментально встановлено, що найменшими показниками ТКЛР серед усього спектру досліджуваних діапазонів температур відзначаються матеріали, які містять модифікатор у кількості $q = 1,0$ мас.ч. Доведено, що для контрольних діапазонів впливу теплового поля (у області склування композитів – $\Delta T = 303 \dots 423$ К і критичних температур – $\Delta T = 303 \dots 473$ К) матеріали, які містять модифікатор за даної концентрації, відрізняються у 1,2...2,3 рази меншими значеннями ТКЛР порівняно з вихідною епоксидною матрицею (ТКЛР зменшується від $\alpha = 9,92 \times 10^{-5}$ К⁻¹ до $\alpha = 4,29 \times 10^{-5}$ К⁻¹ та від $\alpha = 10,91 \times 10^{-5}$ К⁻¹ до $\alpha = 8,95 \times 10^{-5}$ К⁻¹ відповідно). Отже, можна констатувати, що введення модифікатора парааміноазобензолу у епоксидний зв'язувач за такого вмісту дозволяє сформувати композит, який дозволяє забезпечити стійкість розроблених матеріалів до лінійних та об'ємних деформацій у процесі експлуатації.

3. Методом термогравіметричного та диференціально-термічного аналізу досліджено термостійкість модифікованих композитів. Встановлено, що відносна втрата маси для усіх зразків модифікованої матриці у діапазоні температур $\Delta T = 550 \dots 850$ К складає $\varepsilon_m = 66 \dots 80$ %. Максимальне значення екзофекту становить $T_{max} = 558$ К для композиту, наповненого модифікатором парааміноазобензолом у кількості $q = 1,0$ мас.ч. Крім того, такий матеріал відзначається наступними показниками термостійкості:

початкова температура екзоэффекту – $T_n = 509$ К; кінцева температура – $T_k = 861$ К, а відносна втрата маси – $\varepsilon_m = 66$ %.

СИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Buketov A. V. Nanomodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A. V. Buketov, D. O. Zinchenko, S. O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2017. – Vol. 8. – P. 41–54.
2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport*. – 2016. – Vol. 31 (3). – P. 333–342.
3. Чернин Н. Е. Эпоксидные материалы и композиции / Н. Е. Чернин. – М. : Химия, 1982. – 228 с.
4. Buketov A. V. The thermophysical properties of epoxy composites filled with silver carbonate microdisperse particles / A. V. Buketov, O. O. Sapronov, D. O. Zinchenko, V. M. Yatsyuk // *Visnyk of Kherson National Technical University*. – 2015. – № 4 (55). – P. 192–195.
5. Букетов А. В. Улучшение теплофизических свойств композиционных материалов на основе пластифицированной эпоксидной матрицы путем введения огнеупорных мелкозернистых наполнителей различной физической природы / А. В. Букетов, А. А. Сапронов, А. В. Акимов, Н. В. Браило, Д. А. Зинченко // *Механика композиционных материалов и конструкций* – 2016. – № 2. – С. 254–268.
6. Ходаковський О. В. Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту / О. В. Ходаковський, М. Ю. Амелін, С. О. Сметанкін, О. В. Акімов, В. М. Яцюк // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2016. – № 50 (1222). – С.42–46.

REFERENCES

1. Buketov A. V. Nanomodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A. V. Buketov, D. O. Zinchenko, S. O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2017. – Vol. 8. – P. 41–54.
2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport*. – 2016. – Vol. 31 (3). – P. 333–342.
3. Чернин Н. Е. Эпоксидные материалы и композиции / Н. Е. Чернин. – М. : Химия, 1982. – 228 с.
4. Buketov A. V. The thermophysical properties of epoxy composites filled with silver carbonate microdisperse particles / A. V. Buketov, O. O. Sapronov, D. O. Zinchenko, V. M. Yatsyuk // *Visnyk of Kherson National Technical University*. – 2015. – № 4 (55). – P. 192–195.
5. Buketov A. V. Uluchshenie teplofizicheskikh svoystv kompozicionnykh materialov na osnove plastificirovannoy ehpoksidnoy matricih putem vvedeniya ogneupornykh melkozernistykh napolniteley razlichnoy fizicheskoy prirodi / A. V. Buketov, A. A. Sapronov, A. V. Akimov, N. V. Brailo, D. A. Zinchenko // *Mekhanika kompozicionnykh materialov i konstrukciy* – 2016. – № 2. – S. 254–268.
6. Khodakovskiy O. V. Doslidzhennya vplivu paraaminoazobenzolu na adgeziyjni vlastivosti epoksidnoi matrici dlya zakhisnykh pokrittiv zasobiv transportu / O. V. Khodakovskiy, M. Yu. Amelin, S. O. Smetankin, O. V. Akimov, V. M. Yacyuk // *Visnik NTU «KhPI»*. – 2016. – № 50 (1222). – S.42–46.

Ходаковский А. В., Амелин М. Ю., Букетова Н. Н., Яцюк В. Н. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПАРААМИНОАЗОБЕНЗОЛОМ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

На основе проведенных испытаний теплофизических свойств эпоксикомпозитов, наполненных модификатором парааминоазобензолом, с использованием современных методов исследования установлены допустимые пределы температуры, при которых возможно внедрять разработанные материалы. Исследован термический коэффициент линейного расширения (α), теплостойкость (T) и термостойкость эпоксикомпозитов. Установлены абсолютные значения термического коэффициента линейного расширения материалов, которые можно использовать в различных температурных диапазонах. Методом дифференциально-термического и термогравиметрического анализа проведено исследование термостойкости и структурных особенностей материалов при увеличении температуры. Установлено, что для формирования композитных материалов с повышенными показателями теплофизических свойств, целесообразно использовать модификатор в количестве $q = 1,0$ масс.ч. Такой материал характеризуется наибольшей энергией активации, устойчивостью к структурным преобразованиям при максимальных температурах и интенсивным взаимодействием функциональных групп наполнителя с эпоксидным олигомером при структурообразовании на молекулярном уровне всех исследуемых материалов.

Ключевые слова: эпоксидный композит, теплостойкость, термостойкость, деструкция, экзоэффект.

Khodakovskii A. V., Amelin M. Yu., Buketova N. M., Yatsyuk V. M. THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF PARA-AMINOAZOBENZENE-MODIFIED EPOXY MATRICES FOR PROTECTIVE COATINGS IN THE TRANSPORT INDUSTRY

On the basis of tests of thermal properties of epoxy composites filled with modifier using modern research methods permissible limits of temperature, at which it is possible to implement the developed materials are established. The thermal expansion coefficient (α), heat resistance (T) and thermal of epoxy composites are investigated. We set the absolute values of the thermal expansion coefficient of materials which can be used in different temperature ranges. The method of differential thermal and thermogravimetric analysis studied the thermal stability of materials and structural characteristics as the temperature increases. It is found the formation of composite materials with enhanced thermal properties, it is advisable to use as a modifier in an amount of $q = 1,0$ %. This material is characterized by the highest activation energy, resistance to structural change at the highest temperatures and intense interaction of the functional groups of the filler with an epoxy oligomer with the structure formation at the molecular level, all of the materials.

Keywords: epoxy composite, heat resistance, heat resistance, destruction, exoeffect.

© Ходаковський О.В., Амелін М.Ю., Букетова Н.М., Яцюк В.М.

Статтю прийнято
до редакції 21.05.17

СИСТЕМА ІНВАРІАНТНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Тіганов О. С., аспірант Чорноморського національного університету ім. Петра Могили (м. Миколаїв), e-mail: oleg.tiganov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1297-6230

Кравець І. О., к.т.н., доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили (м. Миколаїв), e-mail: agniloga@chmni.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1361-1017

Фісун М. Т., д.т.н., проф., завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету ім. Петра Могили (м. Миколаїв), e-mail: mykola.fisun@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1297-6230

Запропоновано систему розпізнавання об'єкта на зображенні з камери системи відеоконтролю залізничного переїзду на основі згорткових нейронних мереж. Розроблено систему розпізнавання об'єкта на зображенні з використанням архітектур YOLO та SSD. Використано фреймворк Caffe, та бібліотеку OpenCV.

Ключові слова: нейронні мережі, згорткові нейронні мережі, системи комп'ютерного зору.

Вступ. Один з найважливіших напрямків розвитку автоматизації – розвиток систем, що забезпечують безпеку використання залізничного транспорту. Сучасне обладнання більшості залізничних переїздів дає змогу тільки попередити водіїв світловими та звуковими сигналами, перекрити дорогу за допомогою шлагбаумів. Але якщо небезпечна ситуація все ж сталася, співробітники залізниці не мають інформації про стан переїзду. Деякі переїзди обладнані аналоговими системами для контролю стану небезпечної зони, але така система має ряд недоліків. Рішенням проблеми може стати встановлення систем відеоконтролю. У свою чергу, відеонагляд має здійснюватися черговим, це вносить в систему ненадійний людський фактор. Отже, актуальним є створення програмного модуля, який без участі людини на основі даних з системи відеонагляду безпомилково та своєчасно визначить наявність небезпеки та дозволить вжити відповідних заходів для її усунення.

Основний матеріал. Загальна схема процесу пошуку об'єкта на зображенні має наступний вигляд (рис. 1).

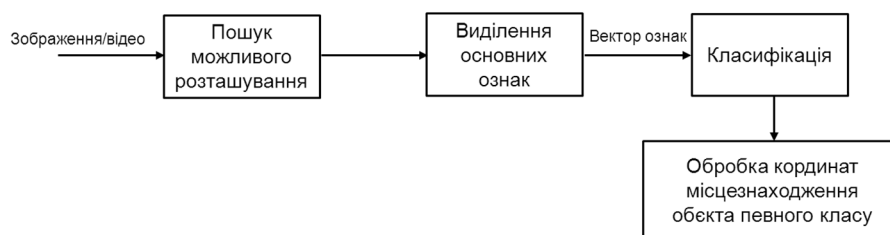


Рисунок 1 – Загальна схема процесу пошуку об'єкта на зображенні

На основі аналізу науково-технічної літератури можна виділити два основних напрями для вирішення проблеми інваріантного розпізнавання образів: часткове (інваріантність щодо повороту, зсуву, масштабу) і загальне (інваріантність щодо форми, ракурсу, текстури). Для задач часткового інваріантного розпізнавання вже зараз існує ряд математичних методів, таких як нейронні мережі, неокогнітрон, згорткові нейронні мережі вищих порядків, статистичні моделі. Основна проблема полягає в практичних складнощах реалізації таких методів. Задача загального інваріантного розпізнавання не вирішена досі. Є окремі успіхи на якість розпізнавання для обмежених класів об'єктів, як правило, обличчя осіб, дорожніх знаків, банківських чеків, які демонструють точність розпізнавання навіть вище, ніж у людини.

Серед найсучасніших методів інваріантного розпізнавання об'єктів можна виділити наступні: метод Віоли-Джонса та ознаки Хаара; метод головних компонент; неокогнітрон та згорткові нейронні мережі [1].

Перші два методи найкраще підходять для розпізнавання одного класу об'єктів, що має невелику внутрішньокласову мінливість, наприклад, розпізнавання облич.

Метод Віоли-Джонса [2] використовує зображення в інтегральному уявленні, що дозволяє швидко обчислювати необхідні об'єкти; використовує ознаки Хаара, за допомогою яких відбувається пошук потрібного об'єкта (в даному контексті, обличчя і його рис); використовує бустінг для вибору найбільш оптимальних ознак для шуканого об'єкта на даній частині зображення; всі ознаки надходять на вхід класифікатора, який дає результат «так» або «ні»; використовуються каскади ознак для швидкого відкидання вікон, де не знайдено обличчя.

Метод головних компонент (principal component analysis) – застосовується для витягу з потрібної інформації з даних великої розмірності. При розпізнаванні об'єктів метод PCA дозволяє відобразити великий одновимірний вектор пікселів, побудований з двовимірного зображення одного об'єкта у різних варіантах, в компактні основні компоненти простору ознак. Результат перетворення можна назвати підпростором проєкції. Підпростір розраховується шляхом визначення власних векторів коваріаційної матриці, отриманої з набору зображень об'єктів.

Неокогнітрон та згорткові нейронні мережі, які є його удосконаленням, використовуються для загального інваріантного розпізнавання об'єктів.

Проведений аналітичний огляд інтелектуальних методів розпізнавання фотографічних зображень та виділення об'єкта з відео потоку показує, що найкращі результати на сьогодні дають згорткові нейронні мережі. Згорткові нейронні мережі (ЗНМ) враховують просторову топологію зображення; не чутливі до спотворень зображення; мають високу швидкість навчання і роботи (особливо при використанні графічних процесорів).

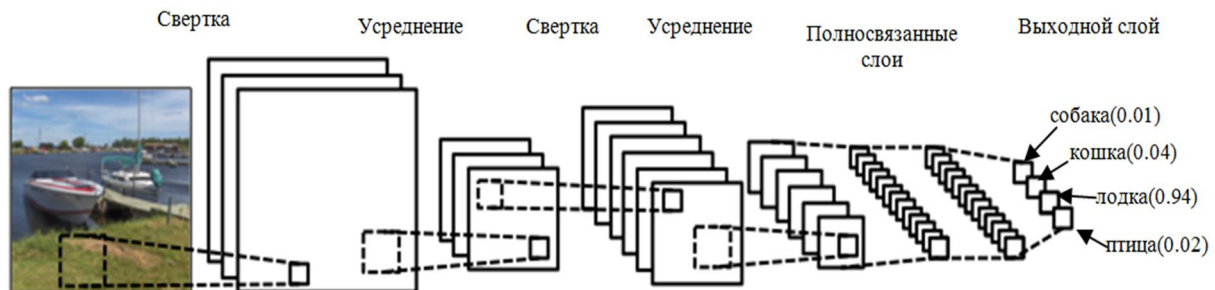


Рисунок 2 – Загальний вигляд загорткової нейронної мережі

Архітектура ЗНМ складається з багатьох шарів. Є два основні типи шарів: згорткові (Convolutional) і підвибіркові (Subsampling), Згорткові та підвибіркові шари чергуються один з одним. Але останнім часом є тенденція до скорочення кількості підвибіркових. Тому підвибіркових шарів часто менше, ніж згорткових або немає взагалі.

У кожному загортковому шарі є набір з декількох фільтрів (ядер згортки), які мають невелике рецептивне поле, але займають усю глибину вхідного об'єму, причому нейрони одного фільтра мають однакові ваги, що застосовуються до всіх локальних ділянок попереднього шару (тим самим здійснюючи згортку). Зображення попереднього шару ніби сканується невеликим вікном і помножується на набір ваг, а результат зберігається на відповідному нейроні поточного шару. Таким чином набір площин є картою ознак (feature maps), де кожна площина знаходить «свої» ознаки зображення в будь-якому місці попереднього шару. На рис. 3 представлена схема нейронів загорткових шарів

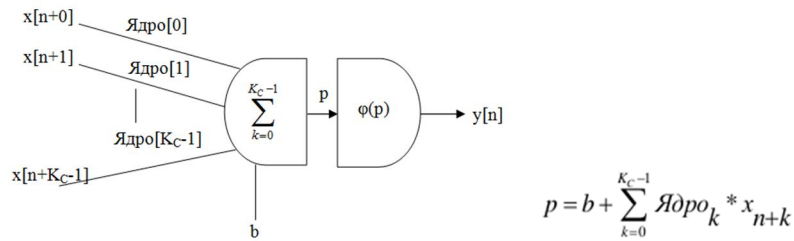


Рисунок 3 – Загальна схема нейрона згорткового шару

На рис. 3 прийнято наступні умовні позначення: КС – загальна кількість нейронів, що входять до рецептивного поля n-го нейрона згорткового шару, ядро [k] – ваги нейрона, що налаштовуюються, b – зсув n-го нейрона, причому b і ядро [k] – одне й те ж для всієї карти згорткового шару і виконує роль фільтру, який шукає певний фрагмент зображення. $x[n + k]$ – вхідні дані для n-го нейрона згорткового шару, $k = 0 \dots KС - 1$. Вхідні дані $x[n + k]$ дають зважену суму з параметрами, що налаштовуюються, тобто з ядром [k], тобто відбувається операція згортки:

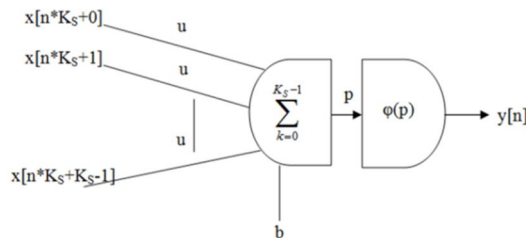


Рисунок 4 – Загальна схема нейрона підвборочного шару

Наступний за згортчим шаром, підвборочний шар зменшує масштаб площин даних, для полегшення виділення основних ознак в наступних шарах. Найефективнішою є «максимальна підвбірка». Остання частина згорткової мережі – це класифікатор ознак, як правило, представлений кількашаровим перцептроном або опорно-векторною машиною. Кількість нейронів у шарі-класифікаторі визначається кількістю класів, до яких слід віднести вхідне зображення.

Було застосовано та порівняно два найсучасніших алгоритму згорткових нейронних мереж SSD [3, 4] та YOLO [4], що мають найвищі швидкість та точність детекції.

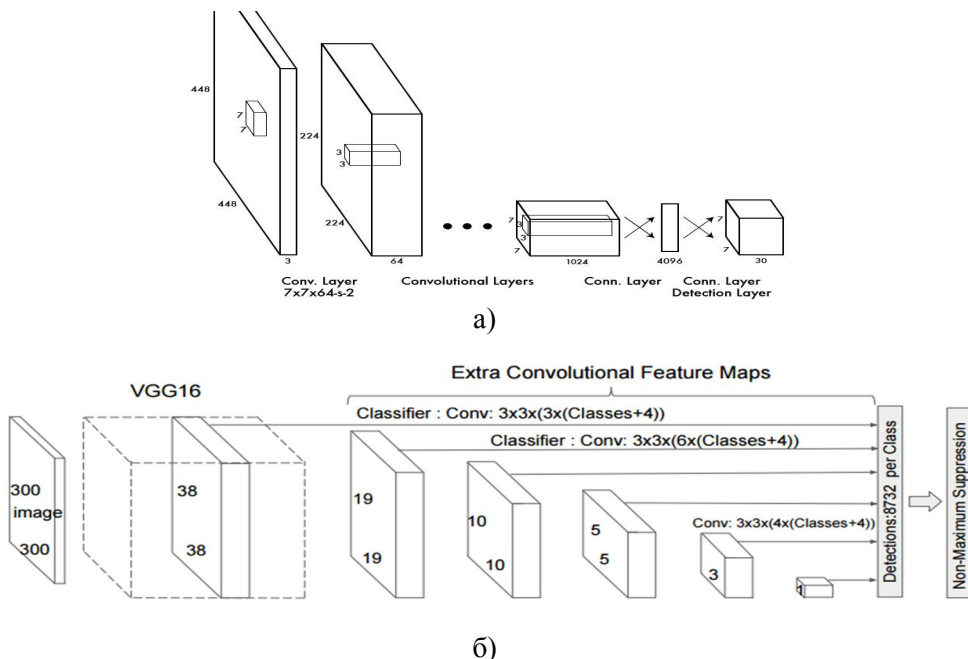


Рисунок 5 – Архітектури YOLO (a) та SSD (б) [2, 3]

YOLO дуже швидка. Під час тестування на одному з найпотужніших графічних процесорів (Nvidia Titan X GPU) базова мережа обробляє 45 кадрів за секунду. YOLO оцінює усе зображення, коли робить прогноз, на відміну від методів, що базуються на ковзаючому вікні або пропозиціях регіонів. Система поділяє зображення за допомогою сітки та для кожної клітинки передбачає декілька обмежувальних рамок і ймовірність наявності в них об'єкта певного класу.

SSD – є наступним поколінням ЗНМ для розпізнавання об'єктів, вона також розглядає зображення цілком, але розглядає сітки різних масштабів. Додавши ряд поліпшень, вдалося значно підвищити точність, порівняно з попереднім варіантом, не втративши при цьому у швидкості розпізнавання. Застосовуючи ці фільтри до різних карт ознак, отриманих з різних шарів на пізніших етапах, мережі дозволяють виконувати детекцію у різних масштабах. Це вирішує значну проблему попередніх мережі і дозволяє досягти високої точності виявлення об'єктів різних форм та розмірів на зображеннях з порівняно низькою роздільністю.

Для реалізації було обрано архітектуру SSD, яка дає найбільшу точність при прийнятній швидкості роботи навіть на відносно «слабких» конфігураціях обладнання.



Рисунок 6 – Результат обробки зображення переїзду мережею SSD

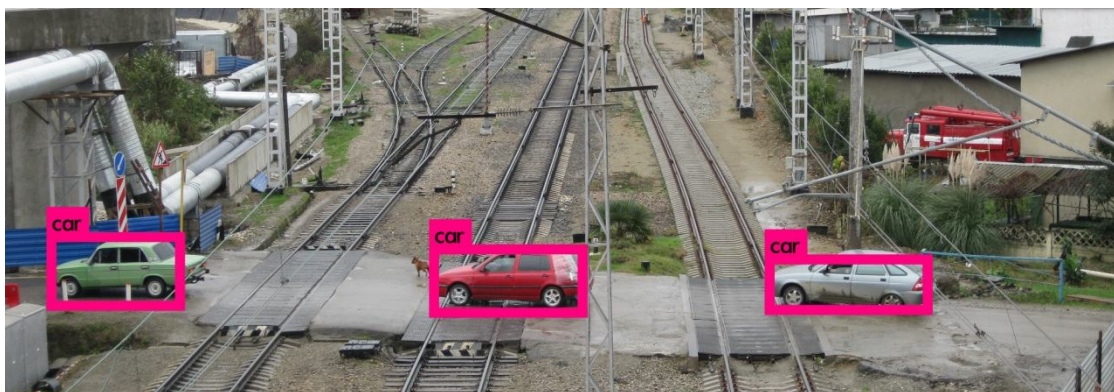


Рисунок 7 – Результат обробки зображення переїзду мережею YOLO

```

car: 59%
x:0.099502, y:0.619009, h:0.093352, w:0.124068
car: 71%
x:0.452229, y:0.630443, h:0.087128, w:0.142194
car: 67%
x:0.757989, y:0.634821, h:0.071889, w:0.150703
    
```

Рисунок 8 – Консольний вигляд результатів обробки зображення переїзду мережею YOLO

На основі архітектури SSD було розроблено програмний додаток для розпізнавання об'єкта на зображенні з камери системи відеоконтролю залізничного переїзду. Додаток створений на основі фреймворку Caffe [5–8], що використовує бібліотеку OpenCV для роботи з відеопотоком.

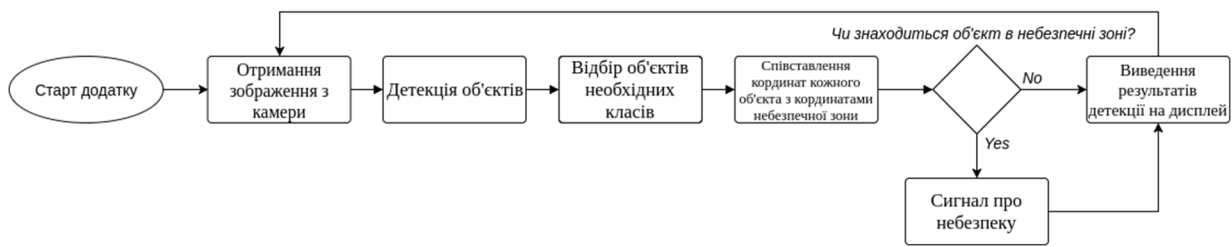


Рисунок 9 – Блок-схема розробленої системи інваріантного розпізнавання об'єктів

Процес роботи додатку можна розділити на декілька етапів. У першу чергу, система отримує на вхід зображення, що, у випадку з системами реального часу, витягується з відеопотоку. В ролі інструмента для цього, а також для подальшої обробки зображення та виведення результатів на екран, використано бібліотеку OpenCV [9, 10]. Наступним кроком, після того як зображення отримано, є його обробка за допомогою певної архітектури згорткової нейронної мережі, тобто локалізація об'єктів. Для визначення місцезнаходження об'єкта та класу, якому він належить, було використано фреймворк глибокого машинного навчання Caffe, що надає можливості для навчання та розгортання моделі нейронної мережі за підготовленою заздалегідь архітектурою.

Для навчання нейронної мережі для локалізації об'єктів використовується метод навчання з учителем, тому що він відповідає потребам алгоритму (використовується невелика кількість класів і він легший у використанні). Для методу навчання з учителем потрібен величезний набір розмічених даних (в нашому випадку – це набір зображень з вручну поміченим місцезнаходженням певних об'єктів). На щастя в наш час у вільному доступі є величезна кількість вільних даних, серед яких є набори, які підійдуть для навчання. Але такі набори зазвичай включають у себе декілька десятків класів об'єктів, тоді як для додатку, що розробляється, достатньо лише декількох (людина, автомобіль, автобус, мотоцикл). Це робить обґрунтованим подальше видозмінення набору і параметрів мережі, та навчання мережі на зміненому наборі даних. Проте це потребує розробки окремого алгоритму обробки даних набору.

Також навчання настільки глибокої нейронної мережі потребує великих об'ємів обчислюваних ресурсів, використання яких економічно недоцільне при розробці прототипу додатку. Тому при розробці та тестуванні додатків використовувалася заздалегідь навчана модель. При подальшому використанні системи можливо здійснити навчання нової моделі на наборі, спеціально підготовленому для задачі, що вирішується за її допомогою. Доцільно використати для навчання сервіси, що надають послуги хмарних обчислень.

Додаток потребує Unix-подібної операційної системи з встановленими пакетами libprotobuf-dev, libleveldb-dev, libsnappy-dev, libopencv-dev, libhdf5-serial-dev, protobuf-compiler. Запускається у консольному режимі за допомогою Python-скрипта. Робоча інформація і повідомлення про небезпеку виводяться в консоль. Зображення з камери з накладеними на нього обмежувальними рамками знайдених об'єктів а також полігон небезпечної зони виводяться на екран у окремому вікні «railroad crossing» (рис. 10).



Рисунок 10 – Приклад зображення, що виводиться на екран при роботі додатку

Висновки. У результаті аналізу літератури було виявлено, що найбільш ефективним з інтелектуальних методів інваріантного розпізнавання об'єктів з відео потоку є згорткові нейронні мережі. Серед них найбільш удосконалені архітектури є YOLO та SSD. На основі архітектури SSD розроблено систему розпізнавання об'єкта на зображенні з камери системи відеоконтролю залізничного переїзду.

REFERENCES

1. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. Hinton. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. In NIPS, 2012.
2. Ole, H.J. Implementing the Viola-Jones face detection algorithm: Master's thesis / H.J. Ole. – DTU, 2008. <http://old.kv.by/index 2001513402>.
3. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. You only look once: Unified, real-time object detection. In: CVPR. (2016)
4. Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng Yang Fu, Alexander C. Berg. «SSD: SingleShotMultiBoxDetector» in European Conference on Computer Vision (ECCV), 2016.
5. Caffe; Deep learning framework by the BVLC [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://caffe.berkeleyvision.org>. (Дата звернення: 15.11.2017.)
6. Caffe: A fast open framework for deep learning [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://github.com/BVLC/caffe> (Дата звернення: 15.11.2017.)
7. LeCun, Y. Gradient-based Learning Applied to Document Recognition [Text] / Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner // Proceedings of the IEEE. v. 86, 1998, pp. 2278–2324.
8. Fukushima, K. Neocognitron: A neural network model for a mechanism of visual pattern recognition [Text] / K. Fukushima, S. Miyake, T. Ito // IEEE Trans. Syst., Man, Cyber., V. SMC-13. – 1983. – P. 826–834.
9. LeCun, Y. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition [Text] / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard, L. D. Jackel // Neural Computation, vol. 1, no. 4, 1989, pp. 541–551.
10. LeCun, Y. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition [Text] / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard, L. D. Jackel // Neural Computation, vol. 1, no. 4, 1989, pp. 541–551.

Тиганов О. С., Кравец І. А., Фісун Н. Т. СИСТЕМА ИНВАРИАНТНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Предложена система распознавания объекта на изображении с камеры системы видеоконтроля железнодорожного переезда на основе сверточных нейронных сетей. Разработана система распознавания объекта на изображении с использованием архитектур YOLO и SSD. Использован фреймворк Caffe, и библиотека OpenCV/

Ключевые слова: *нейронные сети, сверточные нейронные сети, системы компьютерного зрения.*

Tihanov O., Kravets I., Fisun M. THE SYSTEM OF OBJECT'S INVARIANT RECOGNITION FOR RAILWAY TRANSPORT BASED ON NEURAL NETWORKS

The system of object' invariant recognition on the camera image at a railway crossing, based on convolutional neural networks, is proposed. The developed system detects an objects on the image, using YOLO and SSD architectures, the Caffe framework and the OpenCV library.

Keywords: *neural networks, convolution neural networks, object' invariant recognition, computer vision.*

© Тіганов О. С., Кравец І. О., Фісун М. Т.

Статтю прийнято
до редакції 2.06.17

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

А

Амелін М. Ю., 113, 216

Б

Бень А. П., 4
Букетова Н. М., 113, 216
Буря А. І., 122

В

Вільський Г. Б., 10
Волков В. П., 132
Волков Ю. В., 132
Врублевський Р. Є., 128

Г

Габрук Р. А., 17
Годованюк С. П., 24
Голощанов С. С., 144
Грицук І. В., 132
Грицук Ю. В., 132

Є

Єрмошкін М. Г., 31, 202

Ж

Журавська І. М., 37

І

Ігнатенко О. А., 31, 202
Іщенко І. М., 144

К

Касілов О. А., 160
Кирийчук Д. Л., 88
Кириллов О. Л., 75
Клементьєва О. Ю., 185
Кравець І. О., 226
Кулаковська І. В., 37

Л

Липко Є. А., 122
Ложкин Р. С., 88
Лукінова В. В., 31
Ляшенко О. М., 88

М

Малигин Б. В., 160
Марасанов В. В., 166
Мусієнко М. П., 37

Н

Настасенко В. О., 47, 150
Нейман В. М., 192

П

Пипченко А. Д., 61
Поляков В. О., 177
Проценко В. О., 185

Р

Рашковский А. С., 192

С

Сапиґа В. В., 202
Сапронов О. О., 113
Селіванов С. Є., 24
Семененко М. В., 99
Соловей О. С., 4

Т

Тіґанов О. С., 226
Томіна А.-М. В., 122

Ф

Федоров А. І., 68
Фісун М. Т., 226

Х

Хачапуридзе Н. М., 177
Ходаков В. Є., 104
Ходаковський О. В., 113, 216

Ш

Шарко А. О., 166

Я

Якимчук Г. С., 104
Яцюк В. М., 113, 216
Яцюк С. В., 104

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 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 10 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не 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, держава, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, 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. 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 по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності 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, бажано прозорими, і вставлені у файл і роздруківку статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi.

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 приведених вище найменувань.

Список використаної літератури подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. У списку повинно бути не менше 10 джерел, у списку посилань неприпустимо використання ГОСТів та загальнонаціональних стандартів, відсоткове співвідношення самоцитовування – не більше 30 % (тобто якщо Ви використали 10 посилань, з них може бути не більше 3 на роботи автора).

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (*References*), для його оформлення використовувати APA-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://translit.kh.ua> [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

Структуровані анотації українською, російською та англійською мовами обсягом від 100 до 250 слів надаються: на мові 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 відділу технічної інформації ХДМА:

- Комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо;

– рукопис статті (на паперовому носії), підписаний автором(ами) – 2 примірники.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

– структурована 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;

– відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – 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

- Бень А. П., Соловей А. С.** 4
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ
ПОДЪЕМНОГО УГЛА ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГРУЗОВЫХ
ОПЕРАЦИЙ С ТЯЖЕЛЫМИ И НЕГАБАРИТНЫМИ ГРУЗАМИ НА
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СУДАХ
- Вильський Г.Б.** 10
СООТНЕСЕННОСТЬ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА
- Габрук Р.А.** 17
БЕЗПЕКА ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В ЛЬОДОВИХ УМОВАХ
ЛОКАЛЬНО ОБМЕЖЕНОГО ПРОСТОРУ
- Годованюк С. П., Селиванов С. Е.** 24
СТРУКТУРА ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ
НА МОРЕ С УПРАВЛЕНИЕМ
- Ермошкин Н.Г., Игнатенко А.А., Лукинова В.В.** 31
ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭУ СУДНА ТИПА «ИНЖЕНЕР
ЕРМОШКИН» НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЗКИ
- Журавська І. М., Мусієнко М. П., Кулаковська І. В.** 37
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ РОЗВАНТАЖЕННЯ
СУДЕН-КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
МОБІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ
- Настасенко В. А.** 47
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУДОВОЙ
АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ВОЗМОЖНОСТИ
ЕЕ РАЗВИТИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ
- Пипченко А. Д.** 61
РАСЧЕТ КРЕНА СУДНА НА ЦИРКУЛЯЦИИ
- Фєдоров А. І.** 68
ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ВИТРАТ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ
КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

**РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОХОРОНА
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

- Кириллов О.Л.** 75
ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР КРИТЕРИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ
ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЛАБОПРОВОДЯЩИХ ЖИДКОСТЕЙ
В ЗАКРЫТЫЕ ОБЪЕМЫ

<i>Ляшенко Е.Н., Кирийчук Д.Л., Ложкин Р.С.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КООРДИНАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА	88
<i>Семененко М.В.</i> ДО ПИТАННЯ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ	99
<i>Ходаков В. Е., Яцюк С. В., Якимчук Г. С.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ В УКРАИНЕ	104
<i>Ходаковський О. В., Амелін М. Ю., Букетова Н. М., Сапронов О.О., Яцюк В. М.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ ПАРААМІНОАЗОБЕНЗОЛОМ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ	113
ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ	
<i>Буря А. И., Липко Е. А., Томина А.-М. В.</i> ВЛИЯНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ	122
<i>Врублевский Р. Е.</i> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИО	128
<i>Волков В. П., Грицук І. В., Грицук Ю. В., Волков Ю. В.</i> СТРУКТУРНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБИРАННЯ ДАНИХ І МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	132
<i>Ищенко И. М., Голощанов С. С.</i> РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ОМЕДНЕННЫМ МАССИВНЫМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ РОТОРОМ	144
<i>Настасенко В. А.</i> НОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЛАНКОВСКИХ ВЕЛИЧИН ВРЕМЕНИ, ДЛИНЫ И МАССЫ	150
<i>Малигин Б. В., Касилов О. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ	160
<i>Марасанов В. В., Шарко А. А.</i> ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЕДВЕСТНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЯХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ	166

<i>Поляков В. А., Хачапурідзе Н. М.</i> МОДЕЛЬ ТЯГИ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА	177
<i>Проценко В. О., Клементьєва О. Ю.</i> УТОЧНЕННЯ ПІДХОДУ ДО РОЗРАХУНКУ ЗАТИСКНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МУФТ З КАНАТНИМИ ЛАНКАМИ РОЗТЯГУ	185
<i>Рашковский А. С., Нейман В. М.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ	192
<i>Сапига В. В., Ермошкин Н. Г., Игнатенко А. А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА ПРИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ И ОБВОДНЕНИИ СМАЗКИ В ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКАХ	202
<i>Ходаковський О. В., Амелін М. Ю., Букетова Н. М., Яцюк В. М.</i> ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ ПАРААМІНОАЗОБЕНЗОЛОМ ЕПОКСИДНИХ МАТРИЦЬ ДЛЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ	216
<i>Тіганов О. С., Кравець І. О., Фісун М. Т.</i> СИСТЕМА ІНВАРІАНТНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	226
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК	233
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ	234

Науковий журнал

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

№ 1 (16), 2017

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*
Технічний редактор, комп'ютерна верстка *О. Ю. Клементьєва*
Коректор *Н. Грем*
Друк, фальцювальні-палітурні роботи *В. Г. Удов*

Підписано до друку 29.08.2017. Формат 84×108/32.
Папір офсетний.
Ум. др. арк. 16,25. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20