

УДК 631.67:519.8

С.А.ВОЦЕЛКА

Херсонський державний аграрний університет

С.А.РОЖКОВ

Херсонська державна морська академія

НОВЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ИРРИГАЦИОННОГО КАНАЛА

Предложен новый метод идентификации параметров для ирригационного канала – коэффициента шероховатости, путевых потерь и значений неизмеряемых координат. Модель канала представлена в виде полной системы дифференциальных уравнений Сен–Венана. Анализ модели позволил свести решение многокритериальной оптимизационной задачи к одному критерию. Проверка метода выполнена на имитационных данных, соответствующих реальным значениям объекта идентификации.

Ключевые слова: ирригационный канал, уравнения Сен–Венана, идентификация, коэффициент шероховатости, многокритериальная задача

С.О.ВОЦЕЛКА

Херсонський державний аграрний університет

С.О.РОЖКОВ

Херсонська державна морська академія

НОВИЙ МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІРІГАЦІЙНОГО КАНАЛУ

Запропоновано новий метод ідентифікації параметрів для ірригаційного каналу – коефіцієнта шорсткості, шляхових втрат і значень невимірювальних координат. Модель каналу представлена у вигляді повної системи рівнянь Сен–Венана. Аналіз моделі дозволив звести рішення багатокритеріальної оптимізаційної задачі до одного критерію. Перевірку методу виконано на імітаційних даних, що відповідають реальним значенням об'єкта ідентифікації.

Ключові слова: ірригаційний канал, рівняння Сен–Венана, ідентифікація, коефіцієнт шорсткості, багатокритеріальна задача

S.A. VOCELKA

Kherson State Agricultural University

S.A. ROZHKOVA

Kherson State Maritime Academy

NEW METHOD OF IRRIGATION CHANNEL IDENTIFICATION

A new method of identification of parameters for the irrigation channel – roughness coefficient, path losses and values of non-measurable coordinates is proposed. The channel model is represented as a complete system of Saint–Venant equations. The analysis of the model made it possible to reduce the solution of the multicriteria optimization problem to one criterion. The method check is performed on simulation data corresponding to the real values of the identification object.

Keywords: irrigation canal, Saint–Venant equation, identification, roughness coefficient, multicriteria problem

Постановка проблемы

Совершенствование современных систем управления процессами перераспределения водных ресурсов, повышения их эффективности возможно за счет определения оптимальных режимов работы гидроэнергетических систем и гидротехнических сооружений. Для реализации такой системы управления необходимо получить математическую модель открытого канала.

Анализ публикаций по теме исследования

Стохастические модели при моделировании процессов управления нелинейными объектами, к которым относятся оросительные системы, из-за их малой информативности применяются достаточно редко.

Наиболее универсальными для описания процессов движения жидкости являются гидродинамические модели. Существенным преимуществом в таких моделях являются хорошо апробированные исходные положения и точная математическая формулировка задач, при этом гидродинамические модели позволяют получать характеристики процессов движения воды с требуемой детализацией и приемлемой погрешностью, а так же интерполировать и экстраполировать характеристики в широких пределах [4, 10, 14, 16].

В мелиоративной практике все большее применение находит модель течения воды в открытых руслах, которая основана на одномерных уравнениях Сен-Венана [10]. Исходными данными для уравнений Сен-Венана являются морфометрические и гидравлические характеристики русла. Морфометрические характеристики мелиоративного канала известны из проектной и строительной документации и, хотя они подвержены изменениям в процессе эксплуатации по причинам размыва, заиления и просадки грунта основания, но они могут быть уточнены методами инструментальной съемки.

Современные подходы к вопросам проектирования, эксплуатации и реконструкции оросительных систем с использованием систем управления водораспределением и систем водоучёта, как единого технологического комплекса, предполагают применение стандартизированных средств измерения расходов и объёмов воды в рамках соответствующих программных комплексов. В таких комплексах систем управления, как правило, были реализованы методы и методики расчетов для установившегося движения воды и уравнения Сен-Венана [10]. В программном комплексе HEC-RAS (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>) начиная только с 4-й версии реализован динамический режим расчета водного потока. И только последних пару лет, как его стали применять для исследований систем водораспределения в гидромелиоративной практике [12]. К гидравлической характеристике русла канала относится коэффициент шероховатости n , характеризующий диссипацию энергии потока по длине, значение которого зависит от неровности ложа русла, его заиления и размыва, наличия растительности и т.п. Однако предлагаемые для его определения эмпирические формулы не всегда дают желаемую точность при расчетах, поскольку не все факторы, влияющие на него, изучены в достаточной степени. Кроме того, следует учитывать тот факт, что все расчетные соотношения были получены для условий установившегося потока воды [16].

Не менее важным исходным начальным параметром для решения системы Сен-Венана является боковой отбор, характеризующий процессы фильтрации, испарения и др. потери воды, распределенные по длине канала. Большинство ирригационных каналов Украины являются каналами сезонного действия, и в общем случае путевой отбор q является переменной величиной, которая требует периодического уточнения. Учитывая тот факт, что при моделировании реальных объектов к распределенному отбору кроме потерь относят и ряд мелких водопотребителей, информация о работе которых зачастую поступает со значительным запаздыванием, становится очевидным важность решения задачи оперативного уточнения (идентификации) этого параметра. Таким образом, необходимо решать задачу одновременной идентификации этих двух параметров, которые не подлежат непосредственным измерениям – коэффициента шероховатости и путевого отбора.

Известны различные постановки задач по идентификации коэффициента шероховатости и путевого отбора по данным натурных измерений уровня свободной поверхности или глубины и расхода неустановившегося потока [2, 3, 11, 12, 13, 17], а также совместное решение этих двух задач [8, 15], которые предполагают, явно или неявно, априорное знание начального состояния потока по всей длине канала. Как правило, в реальных задачах сведения о начальном (текущем) состоянии водного потока по всей длине ирригационного канала отсутствуют. Для прогнозных расчетов управления каналом по полной системе уравнений Сен-Венана наличие сведений об этих состояниях равнозначно знанию коэффициента шероховатости и путевого отбора. Поэтому использование известных методов идентификации параметров и координат в системах управления реального времени становится достаточно проблематичным.

Формулирование цели исследования

Разработать новый метод совместной идентификации параметров распределенного бокового отбора и коэффициента шероховатости, начальных и текущих значений неизмеряемых координат, пригодный для работы системы управления ирригационным каналом в режиме реального времени.

Изложение основного материала исследования

Нестационарное течение воды описывается одномерной нелинейной гиперболической системой уравнений Сен-Венана [16, 19]:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + gS \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + gS \cdot (I_f - I_0) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где Q – расход воды, S – площадь живого сечения; h – глубина потока в сечении; I_0 – уклон дна канала; I_f – уклон трения; q – путевой отбор.

Для решения системы (1) по маршевой координате (время t в прямом направлении) необходимо знать начальные и граничные условия. В общем случае, граничные условия известны – это данные телеметрии, а начальные условия (распределенные по длине значения расходов и глубин потока), как и коэффициент шероховатости и путевого отбор, необходимо найти.

Поставленная задача решается заменой маршевой (эволюционной) координаты – времени t , при этом решение уравнения находят в частных производных в незамкнутой области при заданных граничных и начальных условиях. Выбрав в качестве маршевой координаты пространственную переменную x и выделив частные производные глубины потока h и расхода Q по координате x , получим:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = -B \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + q \\ \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{gS \cdot (I_0 - I_f) - \frac{\partial Q}{\partial t} + 2v \cdot B \cdot \frac{\partial h}{\partial t}}{(gS - Bv^2)} \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 1. изображен бьеф канала, который ограничен самотечными подпорно-регулирующими сооружениями с затворами, подающими и отводящими поток.

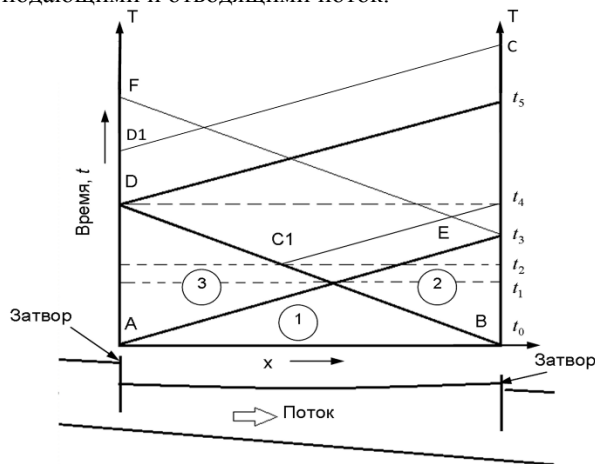


Рис. 1. Схема вычислительных областей модели открытого канала

Сверху, над бьефом канала (рис. 1), изображена пространственно-временная плоскость $x-t$, на которой нанесены линии характеристик системы дифференциальных уравнений (1) для докритического состояния потока. Характеристики являются графиками движения волны, которые перемещаются вверх по течению $[BD, t_3F]$, или вниз $[AE, Dt_5, Ct_4, D1C]$.

Используя определения «зона влияния», «область зависимости» [1, 14] и «характеристический треугольник» [6], выполним решение задачи идентификации при замене маршевой координаты t в два этапа. В качестве начальных условий выбираем ось времени в конце бьефа, где известны значения расходов и глубин потока по данным телеметрии.

Минимальный интервал времени, необходимый для нахождения начального состояния в конце бьефа, должен быть не менее времени прохождения по бьефу прямой и обратной волны $[t_0, t_5]$. На рис.1 область $[t_0, D, t_5]$ – «характеристический треугольник» с основанием $[t_0, t_5]$. С учетом пространственной нелинейности и непрямолинейности характеристик «характеристический треугольник» целесообразно расширить до «характеристической трапеции» с основанием BC и сторонами BD и $CD1$. Далее, задавшись в первом приближении допустимым значением коэффициента шероховатости и путевого отбора, любым численным методом решаем систему уравнений (2) с начальными условиями на интервале $[B, C]$, и по обратной пространственной координате $[B, A]$.

Учитывая, что граничные условия соответствуют истинным значениям только в точках начальных условий B и C , результаты расчета в области $[ADB]$ и выше характеристики $[D1, C]$ не представляют интереса. В результате решения получим расчетные (восстановленные) значения глубин и расходов в области $[D, D1, C, B]$. Расчетные значения глубин и расходов на интервале $[D, D1]$ являются исходными данными для вычисления значений двух функционалов качества оптимизационной задачи – нахождения коэффициента шероховатости и путевого отбора. Первый функционал качества (3) представляет собой значение суммы квадратов отклонений расчетных значений глубин на интервале $[D, D1]$ от данных измерений (эталона), второй функционал качества (4) – тоже, но только для расхода

$$J(h)|_{n,q} = \int_{tD}^{tD1} (h_m - h_i)^2 dt, \quad (3)$$

$$J(Q)|_{n,q} = \int_{tD}^{tD1} (Q_m - Q_i)^2 dt. \quad (4)$$

Таким образом, получаем многокритериальную задачу условной минимизации. Диапазон поиска решений ограничиваем соотношениями физической реализуемости решений.

Особенностью данной задачи является то обстоятельство, что оба функционала вычисляются на одном и том же множестве переменных (n, q) . Поверхности, построенные по данным значений функционалов гладкие и имеют пологий (горизонтальный) тальвег – множество Парето [9]. Так как проекции тальвегов на плоскость, образованную множеством входных переменных, ортогональны, то их пересечение и будет решением общей задачи идентификации значений коэффициента шероховатости и путевого отбора.

Эти особенности позволяют решить задачу идентификации параметров, сведя решение многокритериальной задачи к однокритериальной. Интегральный критерий (5) находим в виде суммы частных критериев с масштабными коэффициентами, значение которых подбирается в каждом конкретном случае в зависимости от морфометрических и других особенностей моделируемого канала.

$$J(hQ)|_{n,q} = J(Q)|_{n,q} + K \cdot J(h)|_{n,q}. \quad (5)$$

Дальнейшее решение сводится к решению задачи однокритериальной векторной оптимизации градиентным методом на интервале $[D, D1]$ по критерию (5) [7]. Еще одной особенностью данной задачи идентификации является то, что в процессе идентификации параметров нигде не используются значения неизменяемых координат канала. Данные последней итерационной процедуры минимизации функционала (5), соответствующие моменту времени $[D, t_4]$, являются «условным начальным состоянием», от которого можно перейти к нахождению текущего состояния с соответствующими измеренными граничными условиями от $[t_4]$ и $[D]$ до текущего момента в прямом времени по уравнению (1) любым численным методом [13, 14, 16]. Если длина интервала ретроспективных данных измерений $[t_0, C]$ для участка AB превысит значение времени добегания прямой и обратной волны, то задача может быть решена полностью.

В задаче нахождения «условного» начального состояния использование частичных решений (области 2 и 3), с их последующим совмещением в интервале $[t_1, t_2]$, вероятно нецелесообразно, так как необходимо будет выполнить расчет по пространственной маршевой координате в прямом направлении (область 3). Варианты дальнейшего уточнения «начального состояния» в области 1 авторами не рассматривались, т.к. в общей задаче управления ирригационным каналом отсутствует прикладное значение использования этих данных.

Предложенный алгоритм был проверен путем постановки численного эксперимента на модельном канале с морфометрическими и гидравлическими характеристиками, подобными первому бьефу Головного Каховского магистрального канала [4, 5, 10]. В качестве возмущений выбирались синусоидально-изменяющаяся и ступенчато-изменяющаяся нагрузки в пределах $0,29 \dots 300 \text{ м}^3/\text{с}$. Параметрическая идентификация выполнялась в диапазонах изменения коэффициента шероховатости $0,015 < n < 0,03$ и коэффициента полезного действия $0,50 < \text{КПД} < 1,0$, что соответствовало диапазону изменений путевого отбора $0,039 > q > 0 \text{ (м}^2/\text{с)}$.

Эталонные значения коэффициентов шероховатости и путевого отбора определялись менее чем за 7 с независимо от точки старта оптимизационной процедуры, при этом размерность задачи расчета одного значения целевого функционала $J(hQ)|_{n,q}$ составила 10 часов модельного времени на 38 км длины бьефа канала, аппроксимированных сеткой 600×380 (шаг по времени – 1 мин., шаг по длине канала – 100 м). Это потребовало решения системы из 1200 нелинейных дифференциальных уравнений в 380 точках по маршевой координате. Полученные результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода. Относительные ошибки по расходу и уровню (глубине) потока воды в канале во всех точках поверхностей, образованных гидрографами и лимнограммами, рассчитанными по всем створам на протяжении 10 часов модельного времени в ортогональных направлениях, составили не более 0,1%. Расчеты (численное интегрирование) выполнялись в системе Matlab стандартной процедурой ode45, процессор Intel Pentium G3220, 3 GHz [7].

На рис.2 и рис.3 показаны 3D-поверхности, а на рис.4 и рис.5 – линии уровня функционалов качества $J(Q)$ отклонений расходов и $J(h)$ отклонений глубин. На рис.6 и рис.7 изображены поверхности расходов во времени – $Q(x, t)$ и глубин во времени – $h(x, t)$ численных экспериментов.

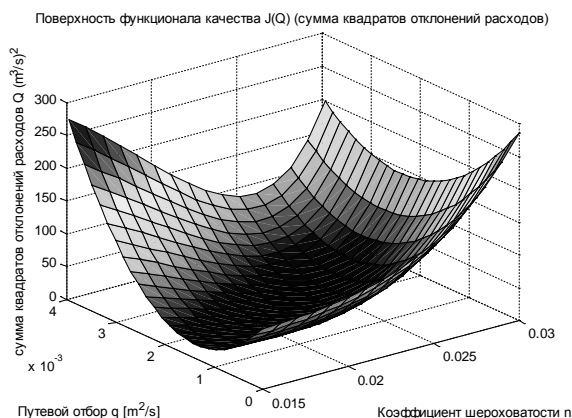


Рис. 2. Поверхность функционала качества $J(Q)$ (сумма квадратов отклонений расходов)

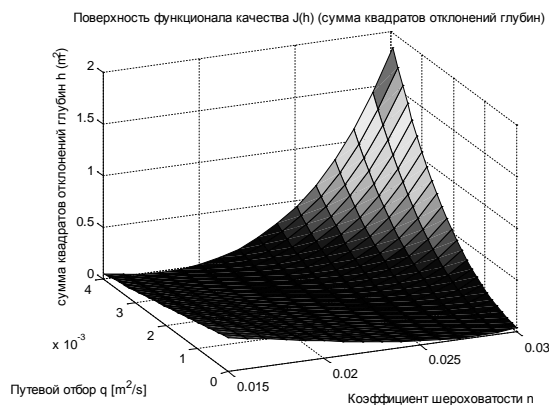


Рис. 3. Поверхность функционала качества $J(h)$ (сумма квадратов отклонений глубин)

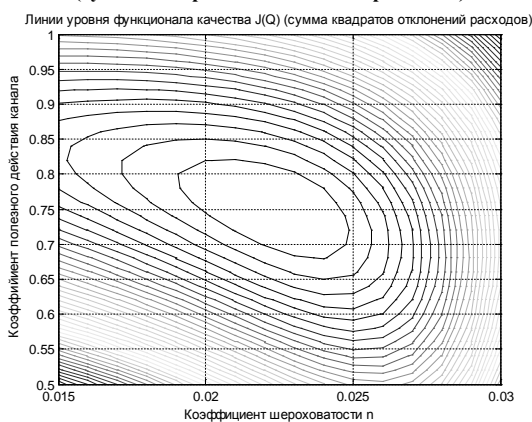


Рис. 4. Линии уровня функционала качества $J(Q)$ (сумма квадратов отклонений расходов)

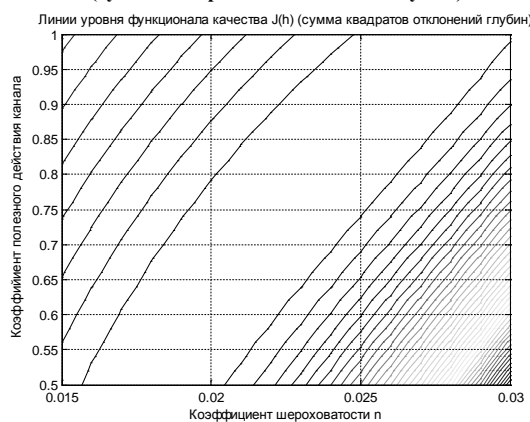


Рис. 5. Линии уровня функционала качества $J(h)$ (сумма квадратов отклонений глубин)

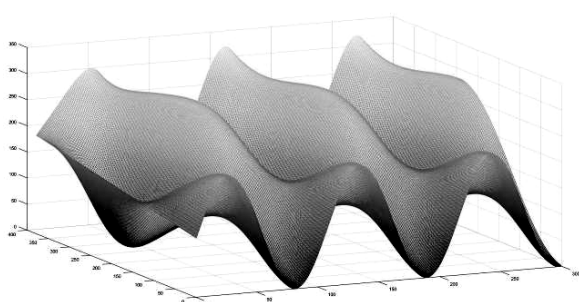


Рис. 6. Поверхность расходов во времени $Q(x, t)$

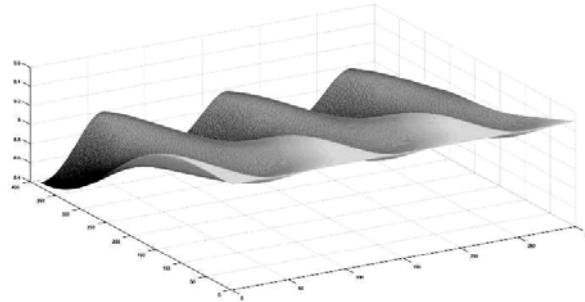


Рис. 7. Поверхность глубин во времени $h(x, t)$

Учитывая тот факт, что частота управлений (корректировок) на реальных оросительных системах обычно превышает один час, а скорость изменения коэффициента шероховатости зависит в основном от скорости зарастания канала и требует корректировки не чаще, чем один раз в сутки, то такие ресурсные затраты на решение идентификационной задачи, по мнению авторов, вполне приемлемы.

Выводы

Предложенный новый метод идентификации параметров ирригационного канала с использованием решения обратной задачи динамики по пространственной координате впервые позволил выполнить оценку коэффициента шероховатости канала, путевого отбора и неизмеряемых координат в рамках единой задачи.

В качестве модели движения потока воды в ирригационном канале использована полная нелинейная система дифференциальных уравнений гиперболического типа Сен-Венана.

Анализ модели позволил свести решение многокритериальной оптимизационной задачи к одному интегральному критерию качества. Проверка метода выполнена на имитационных данных, которые соответствуют реальным значениям объектов идентификации.

Реализация метода предполагает полную водомерность граничных створов канала и наличие ретроспективных данных по этим створам, соответствующих реальным значениям объекта идентификации.

Все вышеперечисленные решения могут быть реализованы в реальном масштабе времени в системе поддержки и принятия решений (СППР) оперативного управления водораспределением на ирригационных каналах.

Список использованной литературы

1. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384 с.
2. Атанов Г. А. О задаче идентификации параметров открытых русел / Г. А. Атанов, С. Т. Воронин, В. К. Толстых // Водные ресурсы. – 1986. – № 4. – С. 69–78.
3. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С. Численный метод идентификации гидравлических параметров // В сб.: Методы механики сплошной среды. – Якутск: Изд. Якут. Фил. СО АН СССР. 1977. С. 30–40. Воеводин А. Ф., Никифоровская В.С. Численный метод решения некоторых обратных задач гидравлики//Водные ресурсы. 1981. № 3. С. 114–118.
4. Воцелка С.А. Моделирование упреждающего управления ирригационными каналами / С.А. Воцелка, С.А. Рожков // Вестник Херсонского национального технического университета. – №3(54). – 2015. – С. 93 – 97.
5. Воцелка С.А. Метод восстановления неизмеряемых координат ирригационного канала / С.А. Воцелка, С.А. Рожков // Вісник Херсонського національного технічного університету. – №03(58). – 2016. – С. 331–336.
6. Годунов С. К. Уравнения математической физики. –Изд. 2-е, исправл. и дополн. – М.:Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 392 с.
7. Дьяконов В.П. Simulink: Самоучитель. –М.: ДМК Пресс, 2015. – 782 с.
8. Евсева Е. Г. Идентификация гидрологических параметров открытых русел: автореферат дис. кандидата физико-математических наук : 01.02.05.– Киев, 1992.– 19 с.
9. Згуровський М. З. Основи системного аналізу / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К.: Видавнична група ВНУ. 2007. – 544 с.
10. Коваленко П. І. Управління водорозподільними системами за принципами ресурсо- та енергозаощадження/ П.І. Коваленко, В.М. Попов. – К.: Аграрна наука, 2011. – 368 с.
11. Попов В.М. Ідентифікація параметрів математичних моделей / В. М. Попов, Б. В. Хом'як // Водне господарство України. – 2008. – № 2. – С 21–26.
12. Романов А. В. Решение обратных задач русловой гидравлики с использованием нелинейных математических моделей / А. В. Романов, П. В. Скрибцов, М. А. Червоненкис // Труды ГУ ГМЦ РФ. – Вып.349. – 2013. – С. 142 – 160
13. Романов А. В. Обратные задачи математического моделирования неустановившегося движения воды в реках. – М.: Научный мир. 2008. – 184 с.
14. Фокс Д. А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981.– 248 с.
15. Becker L., Yeh W. W.- G. (1972). Identification of parameters in unsteady open channel flows.– Water Res. Res., v. 8, No4, pp. 956 – 965.
16. Cunge, J. A. (1980). Practical aspects of computational river hydraulics / J.A. Cunge, F.M. Holly, Jr., A. Verwey. Boston; London ; Melbourne: Pitman. – 420 p.
17. Rivas Perez R., Feliu Battle V., Castillo Garcia F., Linarez Saez A. (2008). System identification for control of a main irrigation canal pool // Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6-11. pp.9649 – 9654. Режим доступа:DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.1459
18. Szymkiewicz R. (1993). Solution of the inverse problem for the Saint Venant equations//Journal of Hydrology, 147. pp.105 – 120.
19. Wylie, E. B. (1969). Control of transient free-surface flow //Journal of Hydraulics, ASCE. pp.347 – 361.