

УДК 631.67:519.8

С.А. ВОЦЕЛКА

Херсонский государственный аграрный университет

С.А. РОЖКОВ

Херсонская государственная морская академия

**МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕИЗМЕРЯЕМЫХ КООРДИНАТ  
ИРРИГАЦИОННОГО КАНАЛА**

*Предложен метод решения граничных задач для ирригационного канала с неизвестными начальными условиями при использовании конечно-разностных схем. Применение метода позволяет получить решения в неизвестных рассматриваемых областях при неизвестных начальных условиях. Для оценки эффективности предложенного метода проведен вычислительный эксперимент, результаты которого подтвердили условия достаточной устойчивости получаемых решений.*

*Ключевые слова: управление, ирригационный канал, уравнения Сен-Венана, упреждающее управление, граничные и начальные условия.*

С.О. ВОЦЕЛКА

Херсонський державний аграрний університет

С.О. РОЖКОВ

Херсонська державна морська академія

**МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ НЕВИМІРЮВАНИХ КООРДИНАТ  
ІРРИГАЦІЙНОГО КАНАЛУ**

*Запропоновано метод розв'язання граничних задач для ірригаційного каналу з невідомими початковими умовами при використанні кінцево-різницевих схем. Застосування методу дозволяє отримати рішення в невідомих розглянутих областях при невідомих початкових умовах. Для оцінки ефективності запропонованого методу проведено обчислювальний експеримент, результати якого підтвердили умови достатньої стійкості одержуваних рішень.*

*Ключові слова: управління, ірригаційний канал, рівняння Сен-Венана, випереджаюче управління, граничні і початкові умови.*

S.A. VOCELKA

Kherson State Agricultural University

S.A. ROZHKOV

Kherson State Maritime Academy

**METHOD RECOVERY IMMEASURABLE COORDINATE IRRIGATION CANAL**

A method for solving boundary value problems for the irrigation canal with unknown initial conditions using the finite difference schemes. Application of the method allows to obtain solutions in unknown areas considered under unknown initial conditions. To evaluate the effectiveness of the proposed method performed computer experiment, the results of which confirmed the sufficient conditions for stability of the solutions obtained.

Keywords: control, irrigation canal, Saint-Venant equations, predict control, boundary and initial conditions.

**Постановка проблемы**

В настоящее время все большую актуальность приобретают задачи повышения эффективности управления потреблением воды при дефиците водных ресурсов и экономии энергоресурсов [1 – 4, 6, 7, 8]. Управление водоподачей в различных ирригационных каналах реализуется по одной из основных технологических схем: 1) по нижнему бьефу; 2) по верхнему бьефу; 3) с перетекающими объемами; 4) по соотношению объемов воды в бьефах и др. При этом эффективная работа ирригационной системы с открытым каналом невозможна без применения современных средств автоматизации, а задача распределения и стабильной подачи воды потребителям, как правило, решается диспетчерами в ручном режиме при условии установившегося потока воды в канале.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Ряд методов управления оросительными каналами, которые позволяют значительно уменьшить удельные расходы электроэнергии на перекачку воды насосными станциями (НС), снизить уровень потерь электроэнергии на водозабор и транспортировку воды по магистральным каналам и межхозяйственной сети и минимизировать потери от непроизводительных сбросов воды были обобщены в работе Malaterre и др.

(1998) [18], где показан линейный квадратичный оптимальный контроллер для оросительных каналов. На практике для автоматических систем управления (АСУ) используют только некоторые алгоритмы управления (Rogers и Goussard (1998)) [20]. Подробные исследования в задачах идеализированного автоматизированного управления наклонными ирригационными каналами выполнены в работах Bautista E., Clemmens A.J. [14].

Задачи математического моделирования неустановившегося движения воды в открытых потоках исследованы в работах Сен-Венана, С.А. Христиановича, В.А. Архангельского, О.Ф. Васильева, Э.Э. Маковского, Стокера и др. Совершенствованию вопросов водораспределения на ирригационных системах с применением автоматизированных систем посвящены работы: Бочкарёва Я.В., Коваленко П.И., Куротченка В.И., Попова В.Н., Михайленко А.И., Маковского Э.Э., Толстых В.К. и др. [5-7, 9-12].

Необходимым условием решения задачи управления оросительными каналами является наличие резервов в ирригационной системе. Это позволяет обеспечивать необходимую производительность перекачивающих насосных станций, пропускную способность подпорно-регулирующих гидротехнических сооружений (ГТС) и распределенных резервных емкостей и объемов в бьефах канала и водохранилищах. Однако при этом диспетчер канала должен не только оперативно определять ход переходного процесса в ирригационном канале в режиме ограниченного по времени прогноза, но и принимать необходимые меры для управления системой канала [4, 6, 7].

Большая протяженность магистральных и межхозяйственных каналов оросительных систем не позволяет в достаточной мере учитывать качественные и количественные характеристики водных ресурсов. При этом неэффективное оперативное управление водораспределением в ирригационной системе приводит к значительным нетехнологическим сбросам, которые достигают 12 ... 35% от величины водозабора [7, 8]. Эти характеристики на практике можно получить только методами математического моделирования, при этом увеличение погрешностей расчетов может иметь, по крайней мере, два основных следствия: недостаточное удовлетворение потребностей водопользователей и увеличение холостых сбросов воды. При моделировании системы управления открытым каналом еще следует учитывать и тот факт, что оросительные системы юга Украины проектировались по нормам, которые не предусматривали бессбросовую работу [1 – 4, 7], при этом водохранилища суточного, декадного, месячного регулирования в системе ирригационных каналов отсутствуют. При создании АСУ ирригационными каналами, с учетом оптимизационных задач управления на главных водозаборных и подпорно-регулирующих сооружениях, разработчики, как правило, применяют балансовые методы учета и прогноза. Эти методы расчета достаточно хорошо известны и применяются для управления водными ресурсами, например, при управлении каскадом водохранилищ. В задаче управления ирригационным каналом бьеф рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами, поэтому для управления каналом этот подход используют и в настоящее время. Для повышения точности оценки состояния объекта по модели, а в конечном итоге, для улучшения управления каналом в целом, в балансовую модель вводят коэффициенты учета времени «добегания» волны, определение которых основано на «опыте эксплуатации» системы, в которых должны учитываться нелинейности и пространственная протяженность бьефа канала.

#### **Цель работы**

Разработка метода восстановления неизмеряемых координат для задачи управления ирригационным каналом и проверка метода определения упреждающего управления, основанного на решении полной системы уравнений Сен-Венана в рамках автоматического управления подсистемы в АСУТП.

#### **Основная часть**

Система ирригационных каналов является объектом с распределенными параметрами. Чтобы получить профили уровней и расходов (скоростей) с достаточно хорошей точностью для прогностических расчетов необходимо выбрать шаг дискретизации по длине канала порядка 0,1 км. Морфометрические и гидравлические характеристики русла, а также граничные условия – водоподача и водоразбор (граничный и путевой) позволяют выполнить расчет динамики бьефа канала на заданном интервале времени.

С режимами работы гидротехнических сооружений и насосных станций непосредственно связаны переходные процессы в системе управления каналом, а следствием их работы являются не только значительные потери воды, но и вероятная возможность перехода системы управления в неустойчивый (критический и/или аварийный) режим работы [1 – 3, 21, 22].

Для построения алгоритма идентификации начального состояния технологического процесса – профилей уровней и расходов, скоростей в ирригационном канале, в качестве входных данных используются оперативные измерения показателей течения: уровень и объемный расход воды в контролируемых точках канала. В реальных условиях информацию об уровнях и расходах получают на границах участков канала, ограниченных подпорно-регулирующими сооружениями образующих «бьефы». Подпорно-регулирующие сооружения, самотечные или перекачивающие насосные станции, оборудуются контрольно-измерительным оборудованием, информация с которых может быть передана на диспетчерский пункт аппаратурой телеметрии либо другим путем. Невозможность прямого измерения состояния передачи воды в ирригационном канале (уровней, расходов, скоростей) с требуемым шагом, позволяет ставить задачу оценки начального со-

стояния с использованием истории измерения показателей в контрольных точках. На рис. 1 показана обобщенная схема системы управления ирригационным каналом с прогнозирующим контроллером [17, 18].

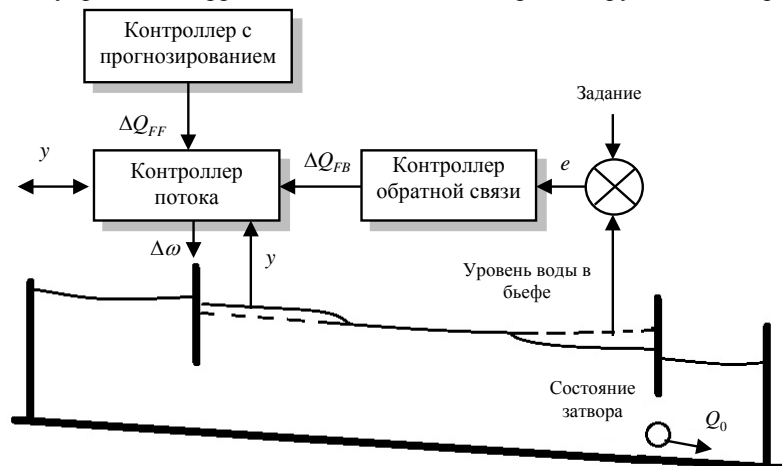


Рис. 1 – Системы управления ирригационным каналом с прогнозирующим контроллером

Решение общей задачи моделирования выполняется после определения неизмеряемых координат для текущего момента времени  $t_{тек}$ . При включении системы управления в момент  $t_0$ , по данным измерений с датчиков уровня и расхода, расположенных на гидротехнических сооружениях, до текущего момента времени  $t_{тек}$ , необходимо идентифицировать начальное состояние по всей длине канала в момент времени  $t_0$  и текущее состояние в момент времени  $t_{тек}$ . Также необходимо определить необходимую глубину ретроспективы данных, достаточной для идентификации состояний объекта управления.

Для решения задач водораспределения в ирригационном канале в качестве математической модели используем полную одномерную нелинейную гиперболическую систему уравнений Сен-Венана [7, 9, 12]:

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

где  $Q$  – расход воды,  $S$  – площадь живого сечения;  $h$  – глубина потока в сечении;

$I_0$  – уклон дна канала;  $I_f$  – уклон трения;  $\frac{\partial Q}{\partial t}$  – инерция;  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{S} \right)$  – конвективное ускорение;  $gS \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$

– гравитация;  $gS \cdot (I_f - I_0)$  – сила трения.

Пусть начальное состояние потока считается неизвестным и путевые потери  $q = 0$ :

$$h(x,t) = h(x,0) \quad Q(x,t) = Q(x,0). \quad (2)$$

Для решения системы (1) по маршевой координате (время  $t$  в прямом направлении) необходимо знать начальные и граничные условия [1]. В общем случае, граничные условия известны – это данные телеметрии, а начальные условия необходимо найти.

В гидрологической практике в качестве начального выбирается состояние водного режима, близкое к установившемуся в моменты времени, достаточно отдаленные от тех, для которых нужно с минимальной погрешностью определять состояние водного режима при неустановившемся движении [9]. Для расчета установившегося неравномерного движения используются динамические уравнения системы (1) с принудительным приравнением нулю всех производных по времени. Затем в уравнение (1) подставляют значения граничных условий и моделируют процесс в прямом времени, решая нелинейные уравнения течения одним из численных методов, где происходит асимптотическое приближение к оптимальной оценке текущего состояния. Аналогичный прием используют, например, в трубопроводно-транспортных системах [19]. Таким образом, в настоящее время отсутствует единый метод идентификации начального и текущего состояния технологического процесса транспорта воды в ирригационных системах, учитывающих нелинейный характер течения.

Для анализа возможностей решения задач идентификации воспользуемся методом характеристик, используемых при решении дифференциальных уравнений в частных производных [1, 21, 22].

Поставленная задача может быть решена при замене маршевой (эволюционной, задачей распространения) координаты время  $t$ , при этом решение уравнения находят в частных производных в незамкнутой области при заданных граничных и начальных условиях [1, 21, 22]. Выбрав в качестве маршевой координаты

ты пространственную переменную  $x$  и выделив частные производные глубины потока  $h$  и расхода  $Q$  по координате  $x$  получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q}{\partial x} = -B \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \\ \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{g \cdot S \cdot (I_0 - I_f) - \frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \cdot v \cdot B \cdot \frac{\partial h}{\partial t}}{(g \cdot S - B \cdot v^2)} \end{array} \right. \quad (3)$$

На рис. 2. изображен бьеф канала, ограниченный самотечными подпорно-регулирующими сооружениями с затворами, предполагающими истечение из-под щита, подающими и отводящими поток.

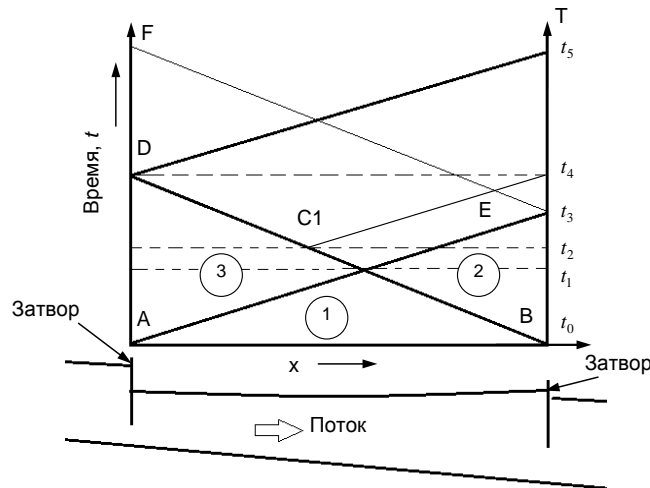


Рис. 2 Системы управления ирригационным каналом с прогнозирующим контроллером

На рис. 2 сверху изображена пространственно-временная плоскость  $x-t$ , на которой нанесены линии характеристик системы дифференциальных уравнений (1) для докритического состояния потока, являющиеся графиками движения волны, которые перемещаются вверх по течению ( $BD, t_3F$ ), или вниз ( $AE, Dt_5, Ct_4$ ). Используя определения «зона влияния», «область зависимости» [13] и «характеристический треугольник» [5], проведем решение задачи моделирования при замене маршевой координаты время  $t$  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 (рис. 2): область  $t_0Dt_5$ . Далее любым численным методом [9, 11] решаем систему уравнений (3) с начальными условиями в точке  $B$  на интервале  $[t_0, t_5]$ , и по обратной пространственной координате  $[B, A]$ . Учитывая, что граничные условия соответствуют истинным значениям только в точках начальных условий  $(t_0, t_5)$ , результаты расчета в области  $ADB$  и выше характеристики  $[D, t_5]$  не представляют интереса. Данные, соответствующие моменту времени  $D-t_4$  являются условным начальным состоянием, от которого можно перейти к нахождению текущего состояния с соответствующими измеренными граничными условиями от  $t_4$  до  $t_{тек}$  в прямом времени. Если длина интервала  $t_0-t_{тек}$  превысит значение времени добегания прямой и обратной волны для участка  $AB$ , задача может быть решена полностью.

Для нахождения в задаче «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).

Предложенный алгоритм был проверен путем постановки численного эксперимента на модельном канале с морфометрическими и гидравлическими характеристиками, подобными первому бьефу Головного Каховского магистрального канала (рис. 3 – рис. 6). В качестве возмущений выбиралась синусоидально-изменяющаяся нагрузка в пределах  $0,29...291 \text{ м}^3/\text{с}$ , а также ступенчато-изменяющаяся нагрузка в тех же пределах. Полученные результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода.

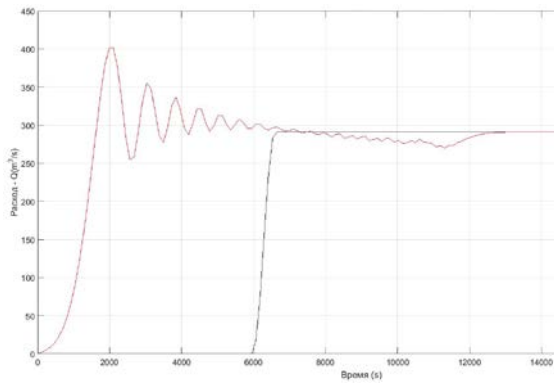


Рис. 3 Тестовый гидрограф (водоподача и водозабор в бьефе канала)

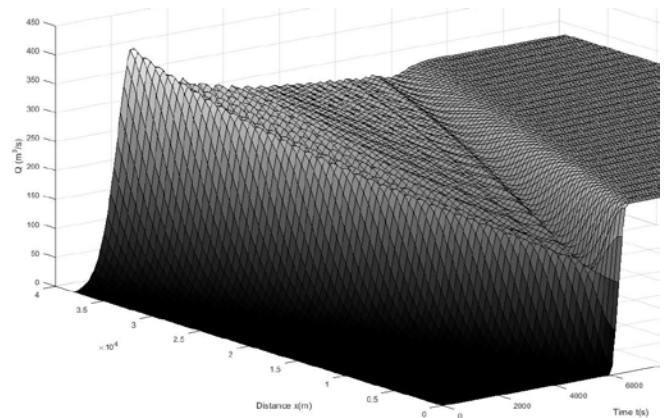


Рис. 4 Тестовый гидрограф (поверхность распространения потока в бьефе канала)

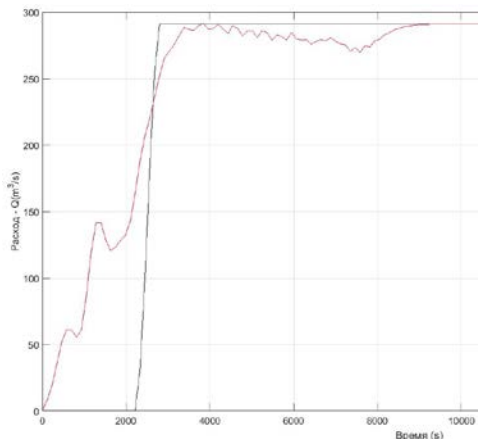


Рис. 5 Восстановленный гидрограф водоподачи по данным измерений в конце бьефа

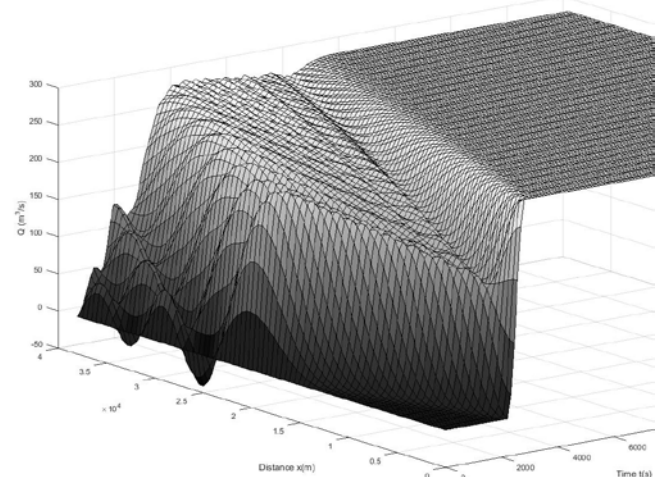


Рис. 6 Восстановленная поверхность потока по данным измерений в конце бьефа

### Выводы

Для задачи управления ирригационным каналом предложен метод восстановления неизмеряемых координат (идентификации начального и текущего состояния), основанный на решении полной одномерной нелинейной гиперболической системы уравнений Сен-Венана с переменной маршевой координатой.

Определена минимальная длина временного интервала ретроспективных данных, необходимая для нахождения начального и текущего состояния только по данным телеметрии в конце бьефа.

Метод может быть применен в системе автоматического управления подсистемы в АСУТП. Для оценки эффективности предложенного метода проведен вычислительный эксперимент, результаты которого подтвердили условия достаточной устойчивости получаемых решений.

### Список использованной литературы

1. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 384 с.
2. Воцелка С.А. Моделирование нестационарного потока в ирригационном канале//Вестник Херсонского национального технического университета. – 2011. – №2 (42). – С. 133–139.
3. 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.
4. Воцелка С.А. Синтез управления бьефом оросительного канала// Вестник Херсонского национального технического университета. – №2(47). – 2013. – С. 67 –71.
5. Годунов С. К. Уравнения математической физики. –Изд. 2-е, исправл. и дополн. –М.:Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 392 с.
6. Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах /Михаил Соломонович Грушевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. –288 с.
7. Коваленко П. І. Управління водорозподільними системами за принципами ресурсо- та енергозаощадження/ П.І. Коваленко, В.М. Попов. – К.: Аграрна наука, 2011. – 368 с.

8. Рено Д. Модернизация управления орошением – методика МАЭЭСОТЕ / Даниэль Рено, Тьерри Факон, Робина Вахадж / Публикации ФАО по ирригации и дренажу. №63. –Рим, 2007. –282 с. Режим доступа: [www.fao.org/3/a-a1114r.pdf](http://www.fao.org/3/a-a1114r.pdf).
9. Рогунович В.П. Автоматизация математического моделирования движения воды и примесей в системах водотоков/ Монография. –Л.:Гидрометеиздат, 1989. –264 с.
10. Рожественский Б. Л., Яненко Н. Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. –М.: Наука, 1978. – 688 с.
11. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. –М.: Наука, 1971. –552 с.
12. Селезнев В.Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прилов. Под ред. В.Е. Селезнева.– М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.
13. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981.– 248 с.
14. Bautista E., Clemmens A. J. (2005) Volume Compensation Method for Routing Irrigation Canal Demand Changes//Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 131, No.6. P.494–503. Режим доступа: DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:6(494).
15. Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, T.A. & Eisenhauer, D.E. 1997. Irrigation performance measures – efficiency and uniformity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 123(6): 423–442.
16. Cunge, J., Holly, F. and Verwey, A. Practical aspects of computational river hydraulics, 1980.
17. Horvath K. Model Predictive Control of Resonance Sensitive Irrigation Canals. Doctoral Thesis /FLUMEN INSTITUTE, Department of Hydraulic, Maritime and Environmental Engineering. April 2013, Barcelona. –264 p. Режим доступа: <http://www.tdx.cat/handle/10803/116419>.
18. Malaterre, P.-O., Rogers D.C., Schuurmans J. Classification of Canal Control Algorithms//Journal of Irrigation and Drainage Engineering, January/February 1998. –Vol. 124. –No. 1, –P.3-10. Режим доступа: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1998\)124:1\(3\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1998)124:1(3)).
19. Modisette J.P. State estimation in online models - Atmos International PSIG Annual Meeting held in Galveston Texas USA. 12 May – 15 May 2009. Режим доступа: <https://atmosi.ru/media/1405/state-estimation-in-online-models.pdf>
20. Rogers, D.C. and J. Goussard (1998, January/February). Canal control algorithms currently in use//Journal of Irrigation and Drainage Engineering 124 (1), 11-15.
21. Szymkiewicz R. (1993) Solution of the inverse problem for the Saint Venant equations//Journal of Hydrology, 147. P.105-120.
22. Wylie, E. B. (1969) Control of transient free-surface flow //Journal of Hydraulics, ASCE, 1969. – P.347-361.