

УДК 631.67:519.8

С.А. ВОЦЕЛКА

Херсонський державний аграрний університет

С.А. РОЖКОВ

Херсонська державна морська академія

АДАПТИВНИЙ МЕТОД СИНТЕЗА ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ БЪЕФА ИРРИГАЦИОННОГО КАНАЛА

Предложен новый адаптивный метод синтеза закона управления бьефа ирригационного канала без ограничений размерности модели. Модель канала представлена в виде полной системы дифференциальных уравнений Сен-Венана. Метод использует прогнозирующие модели, решаемые как прямые и обратные задачи динамики. Адаптивность метода синтеза закона управления обусловлена актуализацией модели перед каждым шагом прогнозирования. Проверка метода выполнена на имитационных данных, соответствующих реальным значениям объекта управления.

Ключевые слова: ирригационный канал, уравнения Сен-Венана, идентификация, коэффициент шероховатости, управление.

С.О. ВОЦЕЛКА

Херсонський державний аграрний університет

С.О. РОЖКОВ

Херсонська державна морська академія

АДАПТИВНИЙ МЕТОД СИНТЕЗУ ЗАКОНУ УПРАВЛІННЯ Б'ЄФОМ ІРІГАЦІЙНОГО КАНАЛУ

Запропоновано новий адаптивний метод синтезу закону керування б'єфу ірригаційного каналу без обмежень розмірності моделі. Модель каналу представлена у вигляді повної системи диференціальних рівнянь Сен-Венана. Метод використовує прогнозуючі моделі, які розв'язуються як прямі і зворотні задачі динаміки. Адаптивність методу синтезу закону керування обумовлена актуалізацією моделі перед кожним кроком прогнозування. Перевірка методу виконана на імітаційних даних, що відповідають реальним значенням об'єкта управління.

Ключові слова: ірригаційний канал, рівняння Сен-Венана, ідентифікація, коефіцієнт шорсткості, керування.

S.O. VOCELKA

Kherson State Agricultural University

S.O. ROZHKOVA

Kherson State Maritime Academy

ADAPTIVE METHOD OF CONTROL OF THE POOL OF THE IRRIGATION CHANNEL

A new adaptive method for synthesizing the law of control of the waterway of the irrigation channel is proposed, without limitations on the dimensionality of the model. A complete non-linear system of differential equations of the hyperbolic Saint-Venant type, solved by numerical methods, is used as a model of water flow in the irrigation channel. The flow state is limited by the value $Fr < 1.0$. The method uses predictive models, which are solved as direct and inverse problems of dynamics. According to the retrospective measurements of water level and discharge at the tail end, the values of the roughness factor n and the dispersed water intake q are found. In this case, the values of the immeasurable coordinates of the state of the model in a limited spatio-temporal region are partially restored. Then, choosing the conditional initial time in the restored coordinate region of the state, the direct problem of dynamics is solved. In this case, completely, throughout the tail, the values of the immutable coordinates of the state of the model in the space-time domain are restored to the current time. Continuing the calculation of the direct problem of dynamics, a forecast is obtained for the change in the co-ordinates of the state of the tail. The depth of the forecast is limited by the time lag for control. Next, we set the desired trajectory of the controlled state coordinate to the depth of the forecast horizon and solve the inverse dynamic problem with respect to the spatial coordinate and find the required control.

The adaptability of the method of synthesis of the control law is due to the actualization of the model before each step of forecasting. The method is designed to work in real time in the system of support and decision-making (DSS) for operational management of water distribution on irrigation canals. The implementation of the method requires the full hydrometry of the boundary points and partial intermediate struts of the tail, with the retrospective

data on these sections. The method of synthesis of the control law can be evolutionarily implemented on a real object, as the channel capacity is increased by software and hardware. The method was tested by setting up numerical experiments that simulate individual stages using both hypothetical and real objects.

Keywords: irrigation canal, Saint–Venant equation, identification, roughness coefficient, control.

Постановка проблемы

Совершенствование современных систем управления процессами перераспределения водных ресурсов, повышения их эффективности является сложной комплексной технологической задачей. Решение таких задач требует определения оптимальных режимов работы, как отдельных гидротехнических сооружений, так и гидроэнергетических систем в целом. Для создания таких систем управления необходимы достаточно точные математические модели технологического процесса, соответствующие методы и алгоритмы, которые можно реализовать программно-аппаратными средствами [2, 13, 14, 17].

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ публикаций по теме, связанной с эффективным использованием водных ресурсов, показал, что более 75% всей пресной воды в мире потребляется ирригационными системами для нужд сельского хозяйства. При этом уже в 2025 году 2/3 населения планеты будут страдать от недостатка пресной воды. Только этих двух фактов достаточно для обоснования важности проблемы рационального использования водных ресурсов [15].

По данным ИВПиМ [9] около 15% объема водозабора на орошение безвозвратно теряется в магистральных каналах и межхозяйственных распределительных сетях из-за несовершенства системы управления процессом водораспределения. Также следует учитывать тот факт, что при транспортировке по открытой распределительной сети более 80% водозабора минимум один раз проходит через перекачивающие насосные станции (НС). Утилизация нетехнологических и аварийных сбросов является также затратными статьями.

Системы автоматизированного управления в ирригационных системах в последнее время главным образом реализуются на следующих методах управления: PID, LQG, Predictive контроль, H_∞ и др. Однако вопросам выбора управляемых и управляющих переменных и их влияния на качество управления внимание уделяется недостаточно, хотя получаемые характеристики могут изменяться в 2-10 раз [14, 15, 18]. Следует отметить, что известные методы синтеза структур системы управления, регуляторов, алгоритмов управления, которые в явной или неявной форме используют полиномиальную модель объекта управления (движения воды в бьефе канала), имеют ограничения размерности, связанные с порядком полинома. При этом пределом является система 9 – 10 порядка, следовательно, бьеф канала может быть разделен только на 4 – 5 участков. Таким образом, очевидно, что для протяженных бьефов ирригационных каналов с переменными по длине морфометрическими и гидравлическими характеристиками, имеющих боковых потребителей, использование вышеуказанных методов становится неэффективно. Это поясняется ненаблюдаемостью и неуправляемостью модели из-за большой размерности системы управления и объекта управления [8, 16].

Цель исследования

Разработать новый адаптивный метод синтеза закона управления бьефа ирригационного канала без ограничений размерности модели, пригодный для работы в реальном масштабе времени.

Изложение основного материала исследования

Нестационарное течение воды в бьефе ирригационного канала описывается одномерной нелинейной гиперболической системой уравнений Сен-Венана [10, 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; q – путевой отбор.

Управление – подача воды в бьеф канала Q_{in} , которое осуществляется на левой границе бьефа канала (верхний створ) через головное водозаборное сооружение (ГС) или перекачивающей насосной станцией (ПНС) (рис.1).

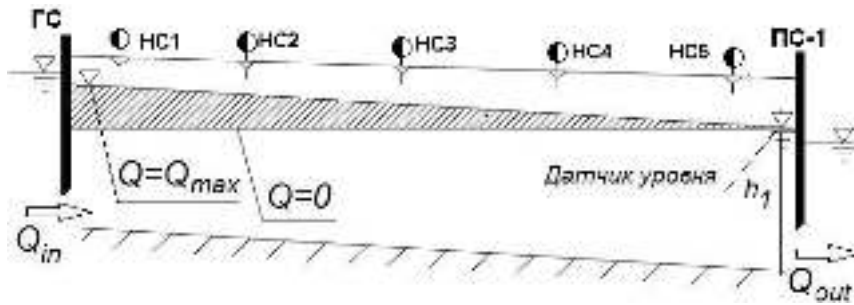


Рис. 1. Схема бьефа открытого канала с регулированием по нижнему бьефу с отнесенным датчиком

Потребители (НС1,..., НС5) находятся на промежуточных створах и на правой границе Q_{out} нижнего створа. Расход в конце бьефа Q_{out} определяет концевое подпорно-регулирующее сооружение: самотёчное (ПС-1) или перекачивающая насосная станция (ПНС).

Целью управления бьефом является удержание уровня (глубины) воды h_1 в нижнем створе канала на постоянном заданном значении или на заданной траектории изменения глубины при наполнении или опорожнении канала.

Датчики уровня воды установлены в начале и конце бьефа. Возможна также установка датчиков и в промежуточных створах. Расходы основных потребителей и расход в нижнем створе Q_{out} , а также уровни воды в контролируемых створах, известны по данным телеметрии не только на текущий момент времени $t_{тек}$, но и ретроспективно. Кроме того, расходы воды частично могут быть прогнозируемыми по заявкам потребителей.

Законом управления для текущего момента времени являются функция времени водоподдачи в начале бьефа $Q_{in}(t)$. Синтез закона управления, максимально соответствующего цели управления, выполняют в пять этапов.

1 этап. Актуализация модели. Идентификация параметров и координат модели на текущий момент времени по ретроспективным данным решается как обратная задача динамики. Здесь происходит замена маршевой (эволюционной) координаты на время t , при этом решение уравнения находят в частных производных в незамкнутой области при заданных граничных и начальных условиях [1, 3, 4]. Выбирая в качестве маршевой координаты пространственную переменную x и выделяя частные производные глубины потока h и расхода Q по координате x , получаем уравнение Сен-Венана в виде:

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

На рис. 2 изображена пространственно-временная плоскость $x-t$, на которой нанесены линии характеристик системы дифференциальных уравнений (1) для докритического состояния потока [5, 11, 19, 20].

Характеристики являются графиками движения волны, которые перемещаются вверх $[t_1, B; t_2, C; t_4, D]$ или вниз $[C, t_6; D, t_7; E, t_8]$ по течению бьефа канала. Известные по данным телеметрии значения расходов и глубин потока выбирают в качестве начальных условий на оси времени в конце бьефа. Минимальный интервал времени, необходимый для нахождения начального состояния в конце бьефа, должен быть не менее времени прохождения прямой и обратной волны $[t_2, t_6]$ по бьефу. Область $[t_2, C, t_6]$ (рис. 2) образует «характеристический треугольник» с основанием $[t_2, t_6]$ [1, 6].

Учитывая пространственные нелинейности характеристик «характеристический треугольник» целесообразно расширить до «характеристической трапеции» с основанием $[t_1-t_6]$ и сторонами $[t_1, B]$ и $[t_6, C]$. Далее, задавая в первом приближении допустимые значения коэффициентов шероховатости и

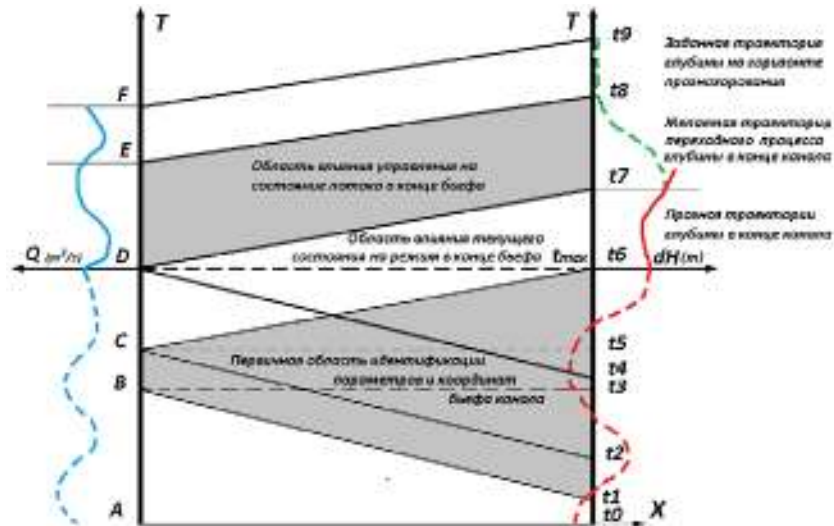


Рис. 2. Схема вычислительных областей модели бьефа открытого канала

путевого отбора, находим решение системы уравнений (2) с начальными условиями на интервале $[t_1, t_6]$ по обратной пространственной координате x .

Учитывая, что граничные условия соответствуют истинным значениям потока только в точках начальных условий, результаты расчета в области за пределами «характеристической трапеции» не представляют интереса.

В результате решения получаем расчетные (восстановленные) значения глубин и расходов в области «характеристической трапеции». Расчетные значения глубин и расходов на интервале $[B, C]$, являются исходными данными для вычисления значений двух функционалов качества (3) и (4) оптимизационной задачи по нахождению коэффициента шероховатости и путевого отбора:

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

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

Первый функционал качества (3) представляет собой значение суммы квадратов относительных отклонений расчетных значений глубин на интервале $[B, C]$ от данных измерений, а второй функционал качества (4) – тоже, но только для расхода.

Особенностью решения данной задачи является тот факт, что оба функционала вычисляются на одном и том же множестве переменных (n, q) . Это позволяет решить задачу идентификации параметров, сведя решение многокритериальной задачи к однокритериальной [5, 8].

Интегральный критерий (5) находят в виде суммы частных критериев с масштабными коэффициентами, значение которых подбирают в зависимости от морфометрических и других особенностей моделируемого бьефа канала или его участка в каждом конкретном случае:

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

Дальнейшее решение сводится к решению задачи однокритериальной векторной оптимизации градиентными методами на интервале $[B, C]$ по критерию (5) [7].

Данные последней итерационной процедуры минимизации функционала (5), соответствующие моменту времени $[C, t_5]$, являются условным начальным состоянием. Далее переходят к нахождению текущего состояния с соответствующими измеренными граничными условиями от $[t_5]$ до текущего момента в прямом времени по уравнениям (1) любым численным методом [4, 5, 11, 12].

2 етап. Прогноз неизменяемой части траектории управляемой координаты. Решая систему уравнений (1) от текущего состояния $t_{мек}$, до момента времени, определяющего начало влияния управляющего воздействия t_7 , находят неизменяемую часть траектории управляемой координаты. В качестве возмущающих воздействий бьефа подставляют значения прогноза граничных условий в конце Q_{out} и известных заявок расходов боковых потребителей. Управляющее воздействие Q_{in} на этом этапе расчета может оставаться на уровне текущего значения. В результате расчета получают неизменяемую часть траектории управляемой координаты, а также значение ее производной в последней точке t_7 .

3 этап. Определение желаемой траектории переходного процесса управляемой координаты. В общем случае, отклонение управляемой координаты от заданной траектории, а также значение ее производной в точке t_7 не равны нулю. На временном интервале $[t_7, t_8]$ задают траекторию, которая обеспечит сопряжение отклонения управляемой координаты с заданной траекторией, а также значение ее производной в точках t_7 и t_8 . На интервале $[t_8, t_9]$ желаемая траектория совпадает с заданной. Длительности интервалов переходного процесса $[t_7, t_8]$, а также горизонта прогнозирования $[t_8, t_9]$ представляют собой самостоятельную задачу и зависят от технических и технологических особенностей бьефа.

4 этап. Определение закона управления. Интервал времени $[t_{мек}, t_9]$, на котором известны прогнозные значения расхода и уровня воды, а также желаемая и заданная траектории управляемой координаты, является начальными условиями для определения необходимого управления (2) по обратной пространственной маршевой координате. Левым граничным условием является координата текущего состояния, а правые граничные условия будут определены только в точке начального состояния. В остальных точках граничные условия могут быть аппроксимированы кривой установившегося неравномерного движения с переменным расходом [9].

В результате решения системы уравнений (2) получаем необходимое управление водоподачей $Q_{in}(t)$ в бьеф на временном интервале $[D, F]$.

5 этап. Определение реализуемого управления. Закон управления $Q_{in}(t)$, полученный на четвертом этапе, по техническим и технологическим причинам обычно практически нереализуем. Необходимо так аппроксимировать необходимое (идеальное) управление, чтобы получить реализуемое решение, наименее отличающееся от идеального. При этом необходимо учитывать ограничения системы управления. После аппроксимации выполняется проверка реализуемого управления подстановкой в систему уравнений (1), где выполняется решение в прямом времени от $t_{мек}$ до t_9 по всему горизонту прогнозирования. Если все ограничения выполняются, то расчет окончен. Если выполняются не все ограничения, то переходят к третьему этапу и повторяют процедуру синтеза с учетом выявленных ограничений.

Далее следует период реализации управляющих воздействий и мониторинга развития процесса по реализуемым траекториям.

Предложенный метод был проверен путем постановки численных экспериментов, моделирующих отдельные этапы с использованием как гипотетических, так и реальных объектов. В качестве гипотетических были выбраны модели с морфометрическими и гидравлическими характеристиками, близкими к первому бьефу канала Днепр-Донбас и Главный Каховский магистральный канал (ГКМК). Первая модель имеет длину 20 км, самотечный водозабор и в конце перекачивающую насосную станцию. Вторая модель длиной 38 км, имеет машинный водозабор, а в конце самотечное подпорно-регулирующее сооружение. Численные эксперименты с этими моделями по компенсации возмущений и переходу на новый режим по заданной траектории частично представлены в [3, 4, 9]. В качестве модели реального объекта были использованы параметры первого бьефа Северо-Крымского канала, где в 2017-2018 гг. были проведены натурные наблюдения и экспериментальные исследования.

Морфометрические характеристики русла канала представлены пятнадцатью поперечными створами с различными расстояниями между ними. Измерения производились самописцами уровня типа «Валдай» на Головном сооружении (ГС) пикета ПК000 в нижнем бьефе, на 28км (ПК282) и на первом подпорном сооружении (ПС-1) (ПК778) в верхнем бьефе. На ГС и на 61 км измерения проводились автоматизированной информационно измерительной системой.

Предварительный анализ натурных наблюдений позволил определить наличие погрешности в отметках нуля водомерных реек, превышающих допустимую величину. Поэтому в число идентифицируемых параметров были включены следующие значения усредненного рассредоточенного отбора q , коэффициенты шероховатости n_1, n_2, n_3 на участках ПК000 – ПК282, ПК282 – ПК611, ПК611 – ПК778 и смещение нуля водомерных реек на ПК000, ПК282, ПК611.

Результаты актуализации модели первого бьефа СКК на отрезке времени $5 \dots 10 \cdot 10^4$ [с] показаны ниже (рис. 3):

%	q	n	dZ0h
Pool_q_n_dZ0h =	$1.446e-04$	0.0225	-0.140
	$1.446e-04$	0.0375	+0.080
	$1.446e-04$	0.0265	+0.028

Рис. 3. Результаты актуализации модели первого бьефа Северо-Крымского канала (СКК)

На рис. 4–7 представлены графики глубин в контролируемых створах, полученные самописцами уровня и восстановленные по модели после выполнения этапа актуализации. На рис. 7 представлены графики расхода воды через головное сооружение, полученные измерительной системой и восстановленные по модели. Отклонения между измеренными и расчетными данными на графиках не превышают точность измерения.

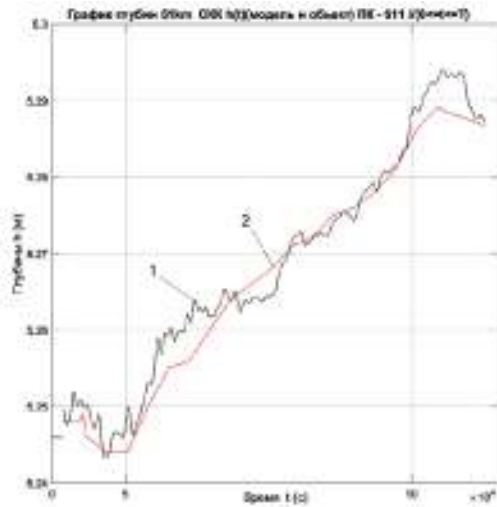


Рис. 4. Результаты идентификации глубин на 61 км:
1) график глубин в контролируемом створе;
2) график глубин, восстановленный по модели

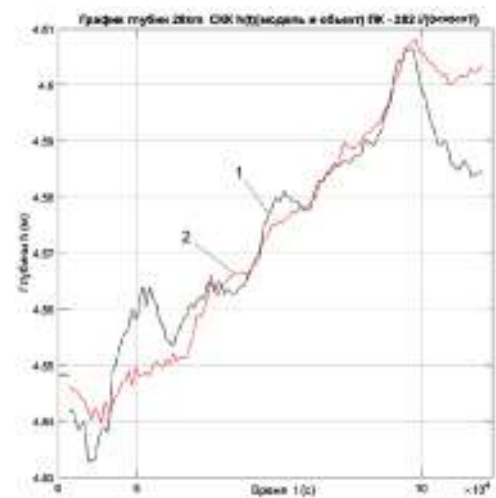


Рис. 5. Результаты идентификации глубин на 28 км:
1) график глубин в контролируемом створе;
2) график глубин, восстановленный по модели



Рис. 6. Результаты идентификации глубин на ГС:
1) график глубин в контролируемом створе;
2) график глубин, восстановленный по модели

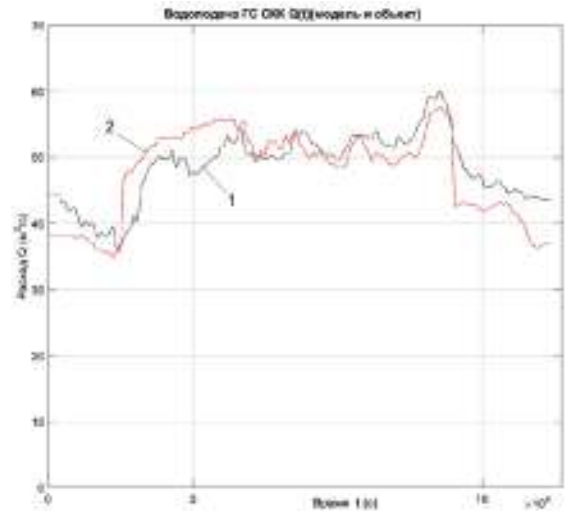


Рис. 7. Результаты идентификации расходов на ГС:
1) график расхода воды через головное сооружение;
2) график расхода воды, восстановленные по модели

Следует отметить, что данный метод синтеза закона управления может быть эволюционно внедрен на реальном объекте, начиная от элементов системы поддержки принятия решения диспетчера, до полной

автоматизации управления бьефом и каналом. При этом на всех этапах внедрения действия диспетчера канала будут оцениваться системой управления, как известные возмущения [15].

На реальных оросительных системах период управляющих воздействий обычно составляет достаточно длительное время (2...4 часа). Скорость изменения коэффициента шероховатости в канале зависит в основном от скорости зарастания канала и требует корректировки не чаще, чем один раз в сутки. Следовательно, основные ресурсные затраты на решение задачи идентификации, на этапе актуализации модели, будут связаны с изменениями неучтенного водозабора потребителей.

Выводы

Предложен новый адаптивный метод синтеза закона управления бьефа ирригационного канала без ограничений размерности модели.

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

Метод использует прогнозирующие модели, решаемые как прямые и обратные задачи динамики.

Адаптивность метода синтеза закона управления обусловлена актуализацией модели перед каждым шагом прогнозирования.

Метод рассчитан на работу в реальном масштабе времени в системе поддержки и принятия решений (СППР) оперативного управления водораспределением на ирригационных каналах.

Метод был проверен путем постановки численных экспериментов, моделирующих отдельные этапы с использованием как гипотетических, так и реальных объектов.

Реализация метода требует полную водомерность граничных створов и полную или частичную промежуточных створов бьефа и боковых потребителей, при наличии ретроспективных данных по этим створам.

Метод синтеза закона управления может быть эволюционно внедрен на реальном объекте, по мере наращивания оснащённости канала программно-аппаратными средствами.

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. 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. Метод восстановления неизмеряемых координат ирригационного канала / С.А. Воцелка, С.А. Рожков // Вісник Херсонського національного технічного університету. – №03(58). – 2016. – С. 331–336.
5. Воцелка С. А. Новый метод идентификации ирригационного канала / С.А. Воцелка, С.А. Рожков // Вісник Херсонського національного технічного університету. – №03(62). – 2017. Т. 1 – С. 132–137.
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. Згуровський М. З. Основи системного аналізу / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К.: Видавнична група ВНУ, 2007. – 544 с.
9. Коваленко П. І. Управління водорозподільними системами за принципами ресурсо- та енергозаощадження / П.І. Коваленко, В.М. Попов. – К.: Аграрна наука, 2011. – 368 с.
10. Романов А. В. Обратные задачи математического моделирования неустановившегося движения воды в реках. – М.: Научный мир, 2008. – 184 с.
11. Фокс Д. А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
12. 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.
13. 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>.
14. 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)).
15. Malaterre P.-O. Control of irrigation canals: why and how? //International Workshop on Numerical Modelling of Hydrodynamics for Water Resources, Centro Politecnico Superior, University of Zaragoza Spain, June 18-21 2007, P. 271-292.

16. 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/stateestimation-in-online-models.pdf>
17. 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.
18. Rivas Perez R., Feliu Batlle 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. P. 9649 – 9654.
– Режим доступа: DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.1459
19. Szymkiewicz R. (1993). Solution of the inverse problem for the Saint-Venant equations // Journal of Hydrology, 147. P.105 – 120.
20. Wylie, E. B. (1969). Control of transient free-surface flow //Journal of Hydraulics, ASCE. P. 347 – 361.