

С.А. ВОЦЕЛКА  
Херсонский государственный аграрный университет  
С.А. РОЖКОВ  
Херсонская государственная морская академия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ИРРИГАЦИОННЫМИ КАНАЛАМИ

*Выполнено моделирование гидродинамической модели ирригационного канала для случая прямого и реверсного расчета потока воды в бьефе. Показана принципиальная возможность синтеза граничного упреждающего управления водоподачей в бьеф по желаемой траектории регулируемой координаты на основании полной системы уравнений Сен-Венана.*

*Ключевые слова: управление, ирригационный, канал, Сен-Венан, упреждающее управление, резервная ёмкость*

С.О. ВОЦЕЛКА  
Херсонський державний аграрний університет  
С.О. РОЖКОВ  
Херсонська державна морська академія

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОПЕРЕДЖУЮЧОГО УПРАВЛІННЯ ІРІГАЦІЙНИМИ КАНАЛАМИ

*Виконано моделювання гідродинамічної моделі ірригаційного каналу для прямого і реверсного розрахунку потоку води в б'єфі. Показана принципова можливість синтезу граничного попереджувального управління водоподачі в б'єф за бажаною траєкторією регульованою координати на підставі повної системи рівнянь Сен-Венана.*

*Ключові слова: управління, ірригаційний канал, Сен-Венан, попереджувальне управління, резервна ємність*

S.A.VOCELKA  
Kherson State Agricultural University  
S.A. ROZHKOV  
Kherson State Maritime Academy

## MODELING FEEDFORWARD CONTROL IRRIGATION CANALS

*Simulation of hydrodynamic model of irrigation canal in the case of direct and reverse flow calculation of water in the pool. The principal possibility of synthesis boundary predictive control of water supply to the pool of the desired trajectory controlled position on the basis of a complete system of Saint-Venant equations.*

*Keywords: control, irrigation canal, Saint-Venant, predictive control, reserve capacity*

### Постановка проблемы

Оросительные системы юга Украины проектировались по нормам, которые не предусматривали бесбросовую работу, при этом они не имели в своем составе водохранилищ суточного, декадного, месячного регулирования. 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.

Основная задача современной оросительной системы – это своевременная и наиболее экономичная подача воды на поле. Важно не только подать воду потребителю; ее следует подать в таком количестве, чтобы максимально исключить холостые сбросы весьма дефицитной и дорогостоящей оросительной воды. Однако значительная протяженность магистральных и межхозяйственных каналов не позволяет обеспечить эффективное оперативное управление водораспределением, что приводит к значительным нетехнологическим сбросам, которые достигают 12 ... 35% от величины водозабора [4, 5, 7, 11].

Одним из путей повышения эффективности эксплуатации магистральных и межхозяйственных каналов оросительных систем, как сложных организационно-технических объектов, является использование современных автоматизированных систем управления (АСУ). Такие системы позволяют 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 [5, 6].

Организация эффективного использования водных ресурсов в условиях ограниченности запасов пресных вод и растущих потребностях в продовольствии обеспечивается соответствующим планом водопользования, который составляется ежегодно с учетом особенностей каждого хозяйства. Такой план плохо отражает фактическое состояние системы, а практическая реализация плана водопользования осуществляется диспетчером оросительной системы.

Необходимым условием решения задачи управления оросительным каналом является наличие резервов самой ирригационной системы: производительности перекачивающих насосных станций, пропускной способности подпорно-регулирующих гидротехнических сооружений (ГТС), распределенных резервных емкостей и объемов в бьефах канала и водохранилищах [5, 11]. Такая задача управления каналом должна решаться с учетом ограничений резервов, при этом диспетчер канала должен оперативно определить ход переходного процесса в ирригационном канале в режиме ограниченного по времени прогноза.

В общем случае известны различные математические методы анализа и синтеза нелинейных систем, каждый из которых применим для определенного класса систем и задач.

Задачи математического моделирования неустановившегося движения воды в открытых потоках исследовали Сен-Венан, С. А. Христианович, В. А. Архангельский, Васильева О. Ф., Маковского Э.Э., Стокер 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. [2, 5, 9].

Однако универсальных аналитических (математических) методов исследования нелинейных систем не существует. Любое исследование нелинейных систем управления (более или менее сложных), завершается математическим моделированием, которое является универсальным (неаналитическим) методом исследования [10].

При моделировании процессов управления нелинейными объектами, к которым относятся оросительные системы, стохастические модели малоинформативные, поэтому они применяются редко.

Более глубокое, чем у стохастических моделей, описание процесса позволяют выполнять концептуальные модели. Большая степень детализации результатов расчетов, возможности применения в реальном масштабе времени и небольшие объемы вычислений являются достоинствами этих моделей. Но в моделях такого типа появляется необходимость оценивания допустимости отказа от учета подпорных явлений в каждом конкретном случае применения.

Наиболее универсальными для описания процессов движения жидкости являются гидродинамические модели, в которых хорошо апробированные исходные положения, точная математическая формулировка задач, является их существенным преимуществом. Гидродинамические модели позволяют получать характеристики процессов движения воды с требуемой детализацией и приемлемой погрешностью, интерполировать и экстраполировать характеристики в широких пределах.

При создании автоматизированных систем управления ирригационными каналами, с учетом оптимизационных задач управления на главных водозаборных и подпорно-регулирующих сооружениях, разработчики, как правило, применяют балансовые методы учета и прогноза.

Балансовые методы расчета достаточно давно применяют для управления водными ресурсами, например, при управлении каскадом водохранилищ. Учитывая тот факт, что в задаче управления часто бьеф рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами, 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 иногда вводят коэффициенты учета времени «добегания» волны, определение которых основано на «опыте эксплуатации» системы. Эти коэффициенты должны учитывать нелинейность и пространственную протяженность бьефа канала.

Балансовая модель представляет собой первое уравнение в системе уравнений Сен-Венана – уравнение неразрывности [3]. Однако балансовые модели расчета не учитывают особенности волнового характера потока воды в открытом русле канала, что значительно ухудшает точность прогноза при расчете управления подпорно-регулирующими сооружениями и насосными станциями. Так как большинство каналов Украины не имеют в своем составе водохранилищ, то совершенствование методов использования распределенных резервных емкостей и объемов в бьефах канала, является актуальной задачей.

Параметры управления водозаборного сооружения канала рассчитываются таким образом, чтобы уровни воды во всех бьефах канала не выходили за пределы границ регулирования. В общем виде такая задача терминального управления уровнем воды в определенных створах бьефов формулируется как задача определения необходимой величины водоподачи в бьефы канала путем:

- изменения водозабора головной насосной станции (ГНС);
- расходов перекачивающих насосных станций (ПНС);
- изменения положения затворов подпорно-регулирующих сооружений (ПРС) на границе бьефов.

**Целью статьи** является моделирование упреждающего управления бьефом ирригационного канала и проверка метода определения упреждающего управления, основанного на решении полной системы уравнений Сен-Венана [1, 2, 13].

#### **Основная часть**

Для расчета динамики бьефа канала на заданном интервале времени необходимо иметь морфометрические и гидравлические характеристики русла, а также граничные условия – водоподачу и водоразбор (граничный и путевой). Переходные процессы в системе управления каналом непосредственно

связаны с режимами работы гидротехнических сооружений и насосных станций, следствием которых являются не только значительные потери воды, но и возможность перехода системы управления в критический и/или аварийный режимы.

Рассмотрим задачу управления работой головным водозаборным сооружением (самотечным или насосной станцией) на открытом канале [5].

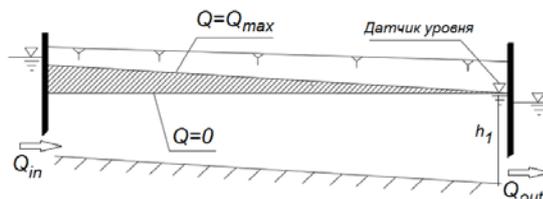


Рис. 1. Продольные профили поверхности потока воды в бьефе канала с регулированием по нижнему бьефу с отнесенным датчиком

Нестационарное течение воды описывается одномерной нелинейной гиперболической системой уравнений Сен-Венана [3]:

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

где  $Q$  – расход воды,  $S$  – площадь живого сечения;  $h$  – глубина потока в сечении;  $I_0$  – уклон дна канала;  $I_f$  – уклон трения;  $q = 0$  – путевые потери.

Управление – подача воды в канал  $Q_{in}$  осуществляется на левой границе канала (верхний створ), при этом потребитель находится на правой границе  $Q_{out}$  (нижний створ) (рис.1). Целью управления бьефом является удержание номинального уровня (глубины) воды  $h_1$  в нижнем створе канала, где работает потребитель с известным переменным расходом  $Q_{out}$ , т.е. необходимо минимизировать функционал:

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_N} (h - h_1)^2 dt, \quad (2)$$

Пусть начальное состояние потока считается известным:

$$h(x,t) = h(x,0) \quad Q(x,t) = Q(x,0). \quad (3)$$

Выделив частные производные глубины потока  $h$  и расхода  $Q$  по координате  $x$ , имеем:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = -B \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \\ \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{g \cdot S \cdot (I_0 - I_f) - \frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \cdot v \cdot B \cdot \frac{\partial h}{\partial t}}{(g \cdot S - B \cdot v^2)} \end{cases} \quad (4)$$

На рис.2 показаны области влияния регулирующего сооружения на состояние потока воды в канале.

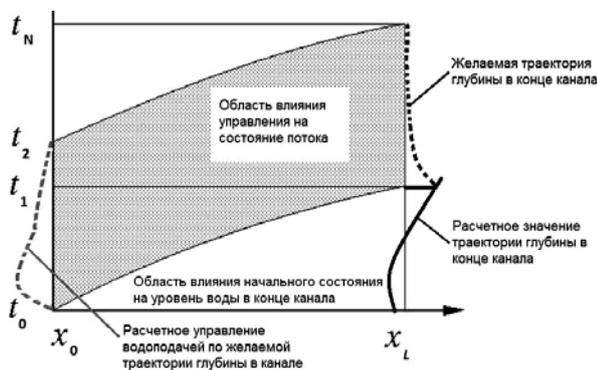


Рис. 2. Области влияния регулирующего сооружения на состояние потока воды в канале

Выполнив расчет траектории изменения глубины воды до момента начала возможного влияния управляющего воздействия  $t_1$  (рис. 2), со стороны головного подпорно-регулирующего сооружения (регулятора в точке  $x_0$ ) по системе дифференциальных уравнений (1) в координатах от  $x_0$  до  $x_L$  и от  $t_0$  до  $t_1$ , получим значение отклонения уровня воды в точке  $x_L(t_1)$ . Далее из точки  $x_L(t_1)$  задаем желаемую траекторию изменения глубины на разумный диапазон предсказания ( $t_1 - t_N$ ).

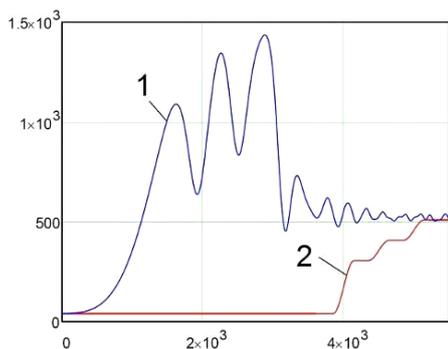
Решая систему дифференциальных уравнений (4) в обратном направлении по пространственной координате от  $t_0$  до  $t_N$  и от  $x_L$  до  $x_0$ , получаем искомое управление – гидрограф водоподачи в бьеф. При этом направление расчета (прямое или реверсное) зависит от расположения подпорно-регулирующего сооружения (регулятора), относительно точки управляемой координаты [1, 13].

В отличие от известных решений подобных задач [9], где для минимизации функционала качества управления (2) используется многократное решение сопряженной системы в обратном по времени направлении с нулевым начальным условием, данный метод предполагает допущение, что такой функционал существует и имеет минимум, равный нулю.

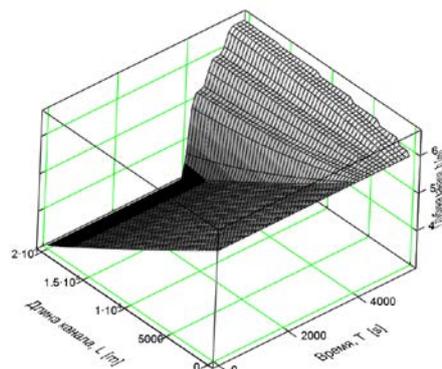
Моделирование системы управления выполнено при следующих исходных данных:

- длина канала  $L=20000$  (м);
- ширина канала по дну  $b=30$ (м);
- заложение откоса канала  $m=4$ ;
- коэффициент шероховатости русла канала  $n=0,0245$ ;
- уклон дна канала  $Io=0,00015$ ;
- количество точек дискретизации по длине канала  $xpts=200$ ;
- количество точек дискретизации по времени  $tpts=100$ ;
- расход в канале (начальное состояние)  $Q_{t0}=40$  ( $m^3/c$ );
- расход в канале (конечное состояние)  $Q_{xt}=510$  ( $m^3/c$ );
- глубина в конце канала (стабилизируемая координата)  $h1=5,97$  (м).

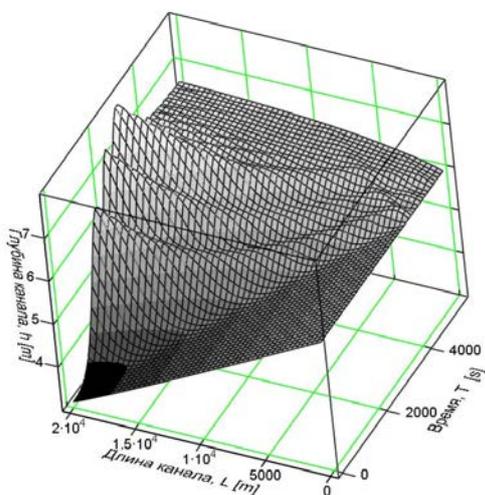
На рис. 3 – 6 показаны результаты синтеза упреждающего управления, стабилизирующего уровень в конце канала, при ступенчатом возрастании нагрузки – расхода потребителя с 10% до 125%. На рис. 5 показан график уровней в канале при синтезе управления реверсным расчетом, на рис. 6 – проверка полученного решения (управления).



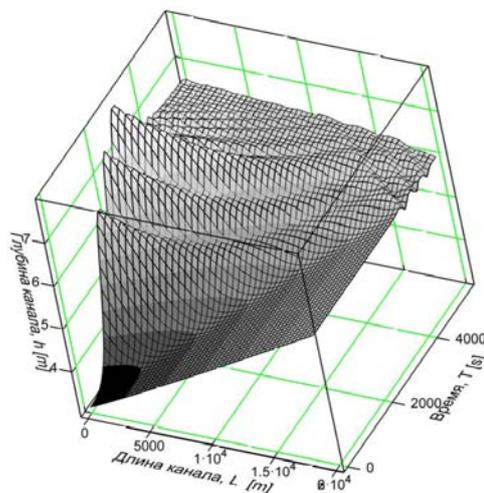
**Рис. 3. Графики управляющего (1) и возмущающего (2) воздействий**



**Рис. 4. График изменения профиля свободной поверхности воды в канале в статическом режиме**



**Рис. 5. График свободной поверхности воды в канале (реверсный расчет по L)**



**Рис. 6. График свободной поверхности воды в канале (прямой расчет по T)**

**Выводы**

Синтез граничного упреждающего управления водоподачей в бьеф ирригационного канала по желаемой траектории регулируемой координаты, переводящее весь поток в желаемое (возможно установившееся) состояние к заданному моменту времени, выполнен путем численного решения обратной задачи динамики исходной одномерной нелинейной системы уравнений Сен-Венана.

Моделирование потока в бьефе ирригационного канала выполнено по полной системе уравнений Сен-Венана, которая позволяет рассчитывать переходные процессы во всем диапазоне изменений нагрузки как при прямом, так и при реверсном направлениях расчета.

На основании ретроспективных данных метод позволяет выполнить идентификацию параметров бьефа с оценкой коэффициента шероховатости русла и потери воды на фильтрацию, испарение, несанкционированный отбор и восстановить значения неизмеряемых координат в модели бьефа (глубины  $h$  и расхода  $Q$ ).

**Список использованной литературы**

1. Воцелка С.А. Синтез управления бьефом оросительного канала / С.А. Воцелка // Вестник Херсонского национального технического университета. –2013. –№2 (47). –С. 67–71.
2. Воцелка С.А. Моделирование каскадной системы управления магистральным каналом / С.А. Воцелка, С.А. Рожков // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2008. –№2 (31). –С.123–129.
3. Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах /Михаил Соломонович Грушевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. –288 с.
4. Каналы саморегулирующиеся с расходом до 2 м<sup>3</sup>/с для оросителей и тупиковых распределителей автоматизированных оросительных систем с широкозахватной дождевальнoй техникой. Технические решения/[А.М.Жарковский, М.Ш.Марголин, М.Р.Линoвич и др.]. – М.: В/О Союзводпроект, 1985. – 100 с.
5. Коваленко П. І. Управління водорозподільними системами за принципами ресурсо- та енергозаощадження/ П.І. Коваленко, В.М. Попов. – К.: Аграрна наука, 2011. – 368 с.
6. Коваленко П.І. Концепція модернізації зрошувальних систем України /П.І. Коваленко, Ю. О. Михайлов// Меліорація і водне господарство, 2002. – Вип. 88. – С 3-14.
7. Коваленко П.І. Реалії та майбутнє автоматизації зрошувальних систем України / П.І. Коваленко, Ю.І. Гринь, Ю.О. Михайлов Ю.О. та ін. // Водне господарство України. –2006. –№ 1. –С.46–54.
8. Марголин М.Ш. Вопросы проектирования оросительных систем /М.Ш.Марголин //Сб. научн. трудов. –М.: В/О Союзводпроект, 1983. – С.140-155.
9. Толстых В.К. Управляемость пространственно-распределенных систем /В.К.Толстых // Математичне та комп'ютерне моделювання. Зб. наук. пр. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, 2012. –Вип. 6. – С. 207–214.
10. Ким Д.П. Теория автоматического управления: Учеб. пособие. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
11. Ромашенко М. Автоматизація зрошувальних систем: досвід і уроки на майбутнє / М. Ромашенко, О. Шевченко // Вод. госп-во України. – 2005. – № 3. – С. 27–32.
12. 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))
13. Wylie, E. B. Control of transient free-surface flow //Journal of Hydraulics, ASCE, 1969. – P.347–361.