

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 626.824

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-4-66-83

Моделирование и исследование закономерностей гидродинамических процессов течений в каналах оросительных систем для задач оперативного диспетчерского управления водораспределением

Игорь Владимирович Ольгаренко¹, Владимир Иванович Ольгаренко²,
Александр Васильевич Колганов³, Владимир Игоревич Ольгаренко⁴

^{1, 2}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова –
филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск,
Российская Федерация

^{3, 4}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹nimi-info@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4865-5642>

²nimi-info@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4399-997X>

³kolganov49@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0234-0079>

⁴olgarenko_vi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9609-5571>

Аннотация. Цель: моделирование и обоснование закономерностей гидродинамических процессов движения потоков жидкостей в системе оросительных каналов для задач оперативного диспетчерского управления водораспределением. **Материалы и методы.** Объект исследования – канал МР-2 Миусской оросительной системы Ростовской области. Организация и проведение экспериментов базируется на методологическом подходе, совместно использующем данные эмпирических наблюдений, метод теории подобия, математическое моделирование и имитационные эксперименты с уравнениями Сен-Венана для установления закономерностей гидродинамических процессов течений жидкости в системе распределительных каналов при различных режимах их работы для решения полного комплекса задач оперативного диспетчерского управления водораспределением. **Результаты и обсуждение.** Авторским коллективом предложено и апробировано численное решение уравнений Сен-Венана для условий установившегося и неустановившегося режима течений в руслах оросительных каналов. Проведен сравнительный расчет отклонения значений объемов воды на участках канала: на участке 1 (трапециевидальный профиль поперечного сечения) при расчетном расходе (Q , м³/с) от 0,94 до 2,4 м³/с относительное отклонение (Δ , %) составило от 6,8 до 13,4 % с максимальными значениями от 17,2 до 27,1 % соответственно; на участке 4 (лотковая сеть) при расчетном расходе (Q , м³/с) от 0,15 до 0,8 м³/с относительное отклонение (Δ , %) составило от 7,2 до 20,0 % с максимальными значениями ($\Delta_{\max}$, %) от 13,1 до 21,5 % соответственно. **Выводы.** В результате математического моделирования, использования методов системного анализа и теории оптимальных решений разработаны новые алгоритмы и компьютерная программа, которые обеспечили значительное повышение производительности труда по сравнению с ручным счетом, повысили эффективность использования водных и энергетических ресурсов на 10–15 %, оптимизировали процессы систем сбора, обработки и передачи информации.

Ключевые слова: моделирование, режим потока, эксплуатация, оросительные системы, водораспределение

Источник финансирования: субсидии на выполнение Государственного задания № 082-00062-25-00 за счет средств федерального бюджета.

Для цитирования: Моделирование и исследование закономерностей гидродинамических процессов течений в каналах оросительных систем для задач оперативного диспетчерского управления водораспределением / И. В. Ольгаренко, В. И. Ольгаренко, А. В. Колганов, В. Иг. Ольгаренко // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 4. С. 66–83. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-4-66-83>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Modeling and research of hydrodynamic flow patterns in irrigation system canals for operational water distribution control

**Igor V. Olgarenko¹, Vladimir I. Olgarenko², Aleksandr V. Kolganov³,
Vladimir Ig. Olgarenko⁴**

^{1,2}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A. K. Kortunov – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

^{3,4}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹nimi-info@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4865-5642>

²nimi-info@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4399-997X>

³kolganov49@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0234-0079>

⁴olgarenko_vi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9609-5571>

Abstract. Purpose: to model and substantiate the hydrodynamic process patterns of flow motion in the irrigation canal system for the purposes of operational water distribution control. **Materials and methods.** The object of the study is the MR-2 canal of the Miuskaya irrigation system in the Rostov region. The organization and conduct of experiments are based on a methodological approach that combines empirical observation data, the similarity theory method, mathematical modeling, and simulation experiments with the Saint-Venant equations to establish the hydrodynamic process patterns of flows in the distribution canal system under various operating modes to solve a full range of problems of operational water distribution control. **Results and discussion.** The numerical solution of the Saint-Venant equations for steady and unsteady flow conditions in the irrigation canal beds was proposed and tested. A comparative calculation of the water volume values deviation in the canal sections was carried out: in section 1 (trapezoidal cross-sectional profile) with a design flow rate (Q , m³/s) from 0.94 to 2.4 m³/s, the relative deviation (Δ , %) was from 6.8 to 13.4 % with maximum values from 17.2 to 27.1 %, respectively; in section 4 (flume network) with a design flow rate (Q , m³/s) from 0.15 to 0.8 m³/s, the relative deviation (Δ , %) was from 7.2 to 20.0 % with maximum values ($\Delta_{\max}$, %) from 13.1 to 21.5 %, respectively. **Conclusions.** Mathematical modeling, systems analysis and optimal decision theory resulted in the development of new algorithms and a computer program that significantly increased labor productivity compared to manual calculations, increased the efficiency of water and energy resource use by 10–15 %, and optimized the processes of information collection, processing, and transmission systems.

Keywords: modeling, flow regime, operation, irrigation system, water distribution

Funding source: subsidies for the implementation of State Assignment No. 082-00062-25-00 are from the federal budget.

For citation: Olgarenko I. V., Olgarenko V. I., Kolganov A. V., Olgarenko V. Ig. Modeling and research of hydrodynamic flow patterns in irrigation system canals for operational water distribution control. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025; 15(4):66–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-4-66-83>.

Введение. При оперативном водораспределении на существующей сети оросительных систем в конечном итоге должен соблюдаться принцип достаточности заявленных объемов воды при соблюдении высокоэффективного операционного подхода к задаче. Практика оперативного водораспределения в свою очередь сводится к поэтапному расчету объемов воды на заданные участки системы, для чего зачастую используются детерминированные гидравлические методы в условиях установившегося и не-установившегося характера течения воды в каналах.

Одним из наиболее научно обоснованных и надежных методов решения алгоритма имитационной модели неуставившегося течения воды для задач оперативного диспетчерского уравнения водораспределением является четырехточечная неявная конечно-разностная схема [1–3].

Преимущество данного методологического подхода заключается в том, что он проверен на устойчивость с учетом условий поддержания высокой точности расчетов на всех уровнях получения данных [4–6], использует в своем основании неявную разностную схему, которая позволяет задавать необходимый временной шаг (Δt) на всем динамическом диапазоне. Это обуславливает решение задачи и определение основных гидродинамических характеристик течения канала на принятом отрезке (x , м) и по всей заданной длине (L , м) – расхода $Q(x_k, t)$ с отметками привязки свободной поверхности $Z(x_k, t)$, ($k = 0, 1, L$) и заданным шагом момента времени t_i , а также его перехода к следующей расчетной точке t_{i+1} ($i = 0, 2L$), что в целом обуславливает гибкость моделирования гидродинамических процессов течений в каналах оросительных систем [7, 8].

Цель работы – моделирование и обоснование закономерностей гидродинамических процессов движения потоков жидкостей в системе оросительных каналов для задач оперативного диспетчерского управления водораспределением.

Материалы и методы. Объект исследования – канал МР-2 Миус-

ской оросительной системы Ростовской области. Исходя из практики водораспределения и подвешенных к ним водовыделов с различным количеством водопользователей на канале выделено 6 элементарных участков. Организация и проведение экспериментов базируется на методологическом подходе, совместно использующем данные эмпирических наблюдений, метод теории подобия, математическое моделирование и имитационные эксперименты с уравнениями Сен-Венана для установления закономерностей гидродинамических процессов течений жидкости в систем распределительных каналов при различных режимах их работы для высокоэффективного решения полного комплекса задач оперативного диспетчерского управления водораспределением в оросительных системах.

Авторским коллективом предложено и апробировано численное решение уравнений Сен-Венана для условий установившегося и неустановившегося режима течений в руслах оросительных каналах [9].

Для моделирования моментов медленно меняющегося режима течений в мелиоративных каналах сделаны следующие допущения:

- для стационарных задач:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = 0 \text{ и } \frac{\partial Q}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где Z – ордината свободной поверхности, м;

x – продольная ордината, ориентированная по ходу течения воды в канале, м;

Q – расход, м³/с;

t – время, с;

- требования к состоянию поперечного сечения:

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} \Big|_{h=\text{const}} = 0, \quad (2)$$

где ω – площадь поперечного сечения, м²;

h – глубина, м;

- функция мощности стока $g_f(x)$ выражена:

$$g_f(x) = q_0 + f_1\delta(x - x_1) + f_2\delta(x - x_2) + \dots + f_n\delta(x - x_n), \quad (3)$$

где q_0 – мощность стока, постоянная на всем участке канала (L, m) ($x \in [0, L]$), описывает сущность факторов испарения, фильтрации и осадков;

$f_1, f_2, \dots, f_n$ – мощности n точечных стоков в точках $x_1, x_2, \dots, x_n$;

- дельта-функция Дирака:

$$\delta(x - \xi) = \begin{cases} +\infty, & x = \xi \\ 0, & x \neq \xi \end{cases}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - \xi) dx = 1, \quad (4)$$

где ξ – вертикальная ордината;

- направление векторов скоростей стоков v_f :

$$v_f = 0; \quad (5)$$

- движение потока в канале осуществляется в одном направлении:

$$Q \geq 0. \quad (6)$$

Подставляя зависимости (1)–(3) в уравнение динамического равновесия Сен-Венана с учетом (4)–(6), получаем дифференциальное уравнение первого порядка относительно функции $h(x)$:

$$\begin{aligned} & \frac{2Q(x)}{\omega(h(x))} \cdot q + g \cdot \omega(h(x)) - B(h(x)) \cdot \frac{Q^2(x)}{\omega^2(h(x))} \cdot \left(\frac{\partial h(x)}{\partial x} - i \right) + \\ & + g \cdot \omega(h(x)) \cdot \frac{Q^2(x)}{K^2(h(x))} - \frac{Q^2(x)}{\omega^2(h(x))} \cdot B(h(x)) \cdot i = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$Q = \begin{cases} Q_0 + q_0 \cdot x, & 0 \leq x < x_1 \\ Q_0 + q_0 \cdot x + f_1, & x_1 \leq x < x_2 \\ \dots & \dots \\ Q_0 + q_0 \cdot x + f_1 + f_2 + \dots + f_n, & x_n \leq x < L \end{cases},$$

где q – фильтрация, m^3/c ;

g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ;

B – ширина потока, m ;

i – уклона дна канала;

K – модуль расхода, $K(x, h) = \omega \cdot C \sqrt{R(n)}$;

C – коэффициент Шези, $C = (1/n)R^{1/6}$;

R – гидравлический радиус;

n – коэффициент шероховатости русла;

Q_0 – расход в точке $x = 0$.

Для решения задачи Коши устанавливаем значение $h(x)$ в произвольной точке области $x \in [0, L]$.

Решение уравнения (7) было проведено численным методом Фелберга из группы методов Рунге-Кутты.

Результаты и обсуждение. Для решения поставленных задач по диспетчерскому управлению водораспределением реализован алгоритм и разработаны авторская расчетная база данных и программа ЭВМ для стационарных режимов течения потоков в открытых оросительных каналах разных форм поперечного сечения¹.

Принцип создания базы данных сводится к представлению всех рассматриваемых узлов оросительной системы, осуществляющих водораспределение, в виде графа, состоящего из ребер и вершин. В роли ребер графа выступают участки каналов (линейные сооружения), а в роли вершин – перегораживающие и водораспределяющие сооружения с их иерархической нумерацией внутри формируемой базы данных.

В программе ЭВМ соответственно рассчитываются спектры изменения режима потока в зависимости от: отметок уровней воды по расчетной длине участка; динамики объемов воды и глубины потока; глубины потока на входе и выходе расчетного участка. Осуществлена возможность учета

¹Информационно-вычислительный комплекс планирования водопользования при эксплуатации мелиоративно-водохозяйственных систем: свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2023610178 / Турапин С. С., Коржов И. В., Ольгаренко И. В., Капустина Т. А., Ольгаренко В. И.; правообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга». Заявка № 2022685654; заявл. 20.12.22; опубл. 10.01.23. EDN: KQUTWT.

стационарного сосредоточенного притока (приходная часть) или водозабора (расходная часть) на единицу длины участка.

Для моделирования условий геометрии каналов использовались следующие исходные данные: характеристика канала – для лоткового сечения – радиус (R , м), для трапецеидального – ширина по дну (b , м) и заложение откосов m ; уклон дна i ; коэффициент шероховатости n ; длина расчетного участка (L , м); расход (Q , м³/с); распределенный приток на единицу длины (qg , м³/с) на 1 пог. м; набор глубин от верхнего бьефа к концу участка hl_i (i = от 1, 2, 3, 4 или 5).

С учетом выбранного шага значения глубины hl_i (i = от 1 до 5) рассчитываются кривые водной поверхности в зависимости от распределения глубин по длине участка; глубины потока в начале участка; графики площадей живого сечения по длине; площади живого сечения в начальной и конечной точке участка; объемы воды на участках, соответствующие диапазону стационарных течений.

Технические показатели экспериментальных участков канала МР-2 приведены в таблице 1. Под номерами (1–3) – трапецеидальный канал, облицованный железобетонными плитами; под номерами (4–6) – железобетонные лотки ЛН-80.

Таблица 1 – Технические показатели экспериментальных участков канала МР-2

Table 1 – Technical indicators of experimental sections of the MR-2 channel

№ участка	Длина участка, м	Показатель								
		Отметки дна участка, м		Форсированные уровни воды участка, м		Нормальные уровни воды участка, м		Расход, м ³ /с		
		начало	конец	начало	конец	начало	конец	$Q_{\text{форс}}$	$Q_{\text{норм}}$	$Q_{\text{мин}}$
1	2910	38,16	37,68	39,41	38,92	39,36	38,87	2,4	2,2	0,94
2	180	37,60	37,58	38,60	38,58	38,57	38,55	1,5	1,4	0,53
3	2950	37,41	36,72	38,25	38,03	38,21	37,98	1,2	1,0	0,37
4	880	37,22	36,60	37,98	37,36	37,88	37,26	0,8	0,7	0,15
5	380	36,00	35,56	36,64	36,20	36,54	36,10	0,7	0,6	0,12
6	470	33,56	33,02	34,20	33,66	34,10	33,56	0,7	0,6	0,12
Примечание – $Q_{\text{форс}}$ – форсированный расход, м ³ /с; $Q_{\text{норм}}$ – нормальный расход, м ³ /с; $Q_{\text{мин}}$ – минимальный расход, м ³ /с.										

На вышеуказанных экспериментальных участках был проведен расчет спектра стационарных режимов течений, который устанавливался как соответствующими расходами в начальных створах участков канала МР-2 в диапазоне от $Q_{\min}$ до $Q_{\text{форс}}$, так и наборами глубин потока в конечных створах. Задачи решались на основе реализации одномерных стационарных уравнений Сен-Венана. На рисунке 1 приведены результаты исследований по формированию спектра стационарных режимов течений и соответствующая динамика распределения величины наполнения канала на всей его протяженности по длине (l , м) и глубине (h , м) на первом экспериментальном участке.

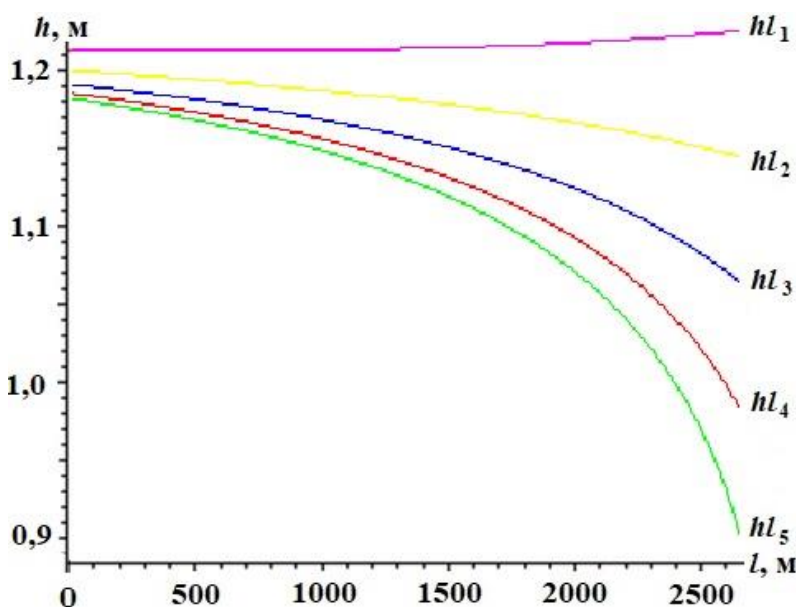


Рисунок 1 – Закономерности формирования свободной поверхности потоков в трапецидальном канале с расходом $Q = 2,4 \text{ м}^3/\text{с}$ (участок 1)

Figure 1 – Patterns of formation of the free surface of flows in a trapezoidal channel with a flow rate of $Q = 2.4 \text{ м}^3/\text{с}$ (section 1)

Анализом установлено, что при снижении величины наполнения канала в конце участка кривая подпора из своего первоначального состояния переходит в кривую спада. Последующие снижения глубины течения на выходе приводят к разрывным решениям уравнения Сен-Венана, характеризующимся резкими скачками и разрывом функции. Следует отметить, что полученные закономерности по изучению спектра стационарных ре-

жимов на первом экспериментальном участке характерны для всех участков с трапецидальной формой поперечного сечения канала.

На экспериментальных участках (4–6) вода на орошение сельскохозяйственных культур подается по железобетонным лоткам ЛН-80. Поэтому дальнейшие исследования были посвящены изучению особенностей стационарных течений в лотках. На рисунке 2 в качестве примера приведены закономерные формирования спектра стационарных режимов по длине лотка ЛН-80, участок 4 с расходом $Q = 0,80 \text{ м}^3/\text{с}$. Анализ данных показывает, во-первых, что водная поверхность на экспериментальных участках характеризуется в общем как кривая спада, причем с «зависанием» величины наполнения в канале на входе участка, т. е. эта величина принимает практически постоянное значение при задании любой величины наполнения на выходном участке канала. Во-вторых, разрывные решения стационарных уравнений Сен-Венана возникают при малых величинах наполнения канала на выходе из участка.

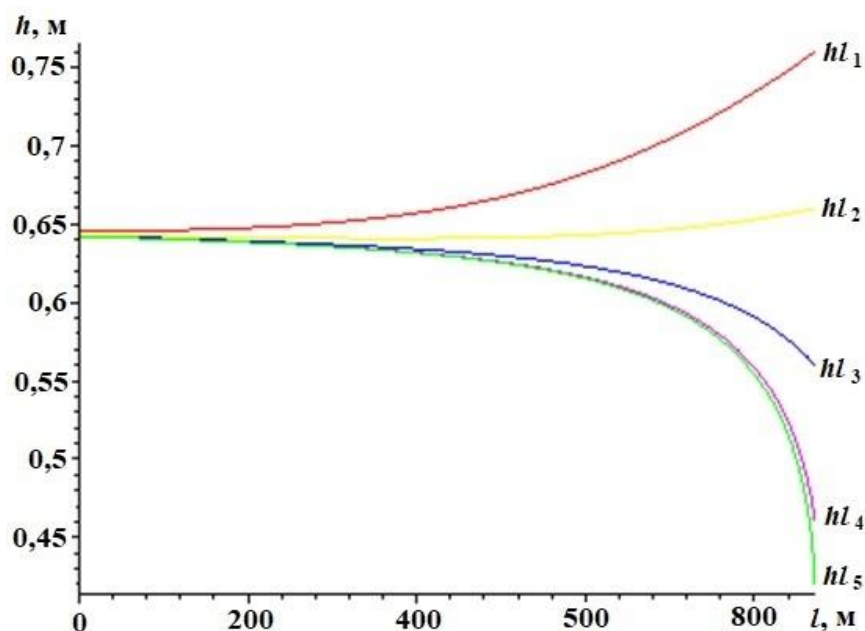


Рисунок 2 – Закономерности формирования свободной поверхности потоков в лотке для спектра стационарных режимов $Q = 0,80 \text{ м}^3/\text{с}$ (участок 4)

Figure 2 – Patterns of formation of the free surface of flows in a flume for the spectrum of stationary modes $Q = 0.80 \text{ м}^3/\text{с}$ (section 4)

Таблица 2 – Величина наполнения и скорость течения в конечном бьефе участка

Table 2 – Filling volume and flow velocity in the final pool of the section

Расход Q , $\text{м}^3/\text{с}$	Характеристика течений			
	Нестационарные		Стационарные	
	Глубина потока h , м	Скорость потока V , м/с	Глубина потока h , м	Скорость потока V , м/с
Участок 1				
2,4	0,66	1,46	0,54	1,92
1,9	0,56	1,40	0,50	1,69
1,3	0,44	1,37	0,40	1,55
0,94	0,35	1,33	0,30	1,61
Участок 3				
1,2	0,42	1,34	0,36	1,63
0,9	0,35	1,27	0,30	1,54
0,5	0,24	1,12	0,2	1,39
0,37	0,19	1,09	0,18	1,16
Участок 4				
0,8	0,46	1,68	0,45	1,73
0,7	0,42	1,66	0,39	1,79
0,15	0,20	1,03	0,18	1,21

Для установления сущности физических эффектов были приведены сопоставимые эксперименты, полученные в результате исследований по установлению закономерностей формирования спектра стационарных режимов течения в канале с теми же исходными характеристиками, как нестационарное медленно меняющееся течение. Результаты исследований для трех участков (участки 1 и 3 – каналы трапецеидальной формы поперечного сечения, 4 – железобетонный лоток ЛН-80) представлены в таблице 2.

Эксперименты проводились в диапазоне изменения воды в головных участках каналов: участок 1 – от 2,4 до 0,9 $\text{м}^3/\text{с}$; участок 2 – от 1,2 до 0,37 $\text{м}^3/\text{с}$; участок 4 – от 0,8 до 0,15 $\text{м}^3/\text{с}$, с определением соответствующих величин наполнения каналов и скоростей течения потока нестационарных и стационарных режимов по моделям в конечных створах участков. Критические величины наполнения каналов трапецеидальной формы поперечного сечения определялись по зависимостям:

$$h = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{b^2 \cdot g}}, \quad (8)$$

где α – коэффициент соответствия, $\alpha = 1,1$;

b – ширина дна, м.

$$\frac{\omega^3}{B_k} = \frac{\alpha \cdot Q^2}{g}, \quad (9)$$

где B_k – ширина потока по водной поверхности, м.

Анализ приведенных данных показывает, что сущность физических эффектов, которым сопутствует разрывность решений стационарных уравнений при установлении в конце исследуемых участков канала низких уровней наполнения, весьма близких к соответствующим разрывным решениям, объясняется нарушением закономерности медленно меняющегося течения потока и невыполнением условия, при котором число Фруда должно быть меньше единицы.

Сопоставление величины наполнения канала (h , м) и скорости (V , м/с) при нестационарном характере течения в конечном створе участков с соответствующими величинами, после которых происходит разрыв решения стационарных уравнений и невыполнение условия медленно меняющегося течения, характерны для расчетов, когда используется нестационарная система уравнений.

В этом ключе следует оценить степень влияния технико-технических характеристик канала на зависание глубины при входе в него. Рассчитаем стационарные режимы со значениями расхода ($Q = 0,4$ и $0,8 \text{ м}^3$) и уклоном дна участка ($i = 0,00021$) для удлиненного и расширенного областей 4-го участка (рисунки 3, 4).

Анализируя полученные данные, характеризуем эффект «зависания» соотношением расхода и уклона дна, характерных для участков лотковой сети на Миусской ОС. В лотках с большими характеристиками прогнозируется такая же картина. Однако при существенном уменьшении расхода и уклона дна лотка глубины потока на входе участка будут заметно различаться, что в общем случае подтверждается серией наблюдений.

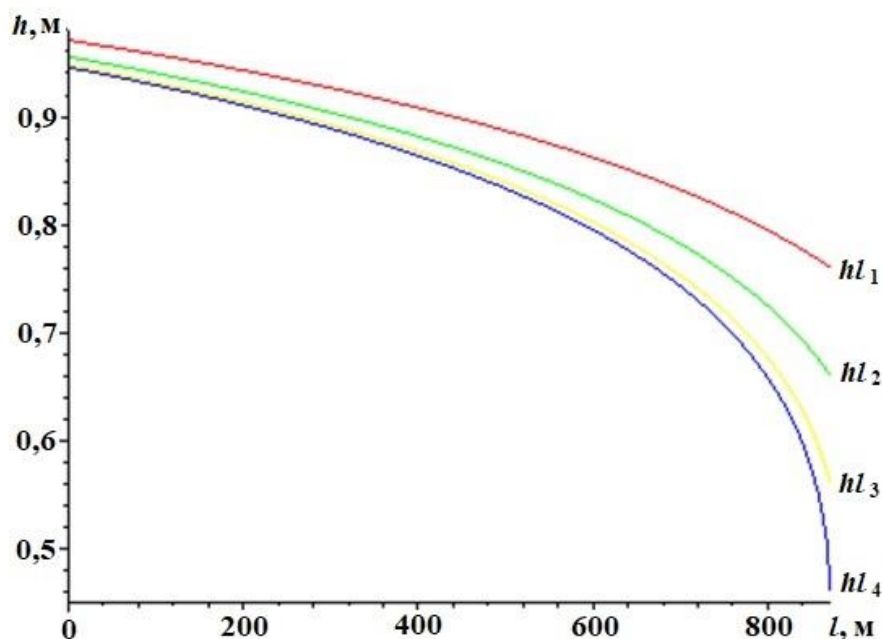


Рисунок 3 – Закономерности формирования свободной поверхности потоков в лотке для спектра стационарных режимов с расходом $Q = 0,80 \text{ м}^3/\text{с}$ (участок 4, уклон $i = 0,00021$)

Figure 3 – Patterns of formation of the free surface of flows in a flume for a spectrum of stationary modes with a flow rate of $Q = 0.80 \text{ м}^3/\text{с}$ (section 4, slope = 0.00021)

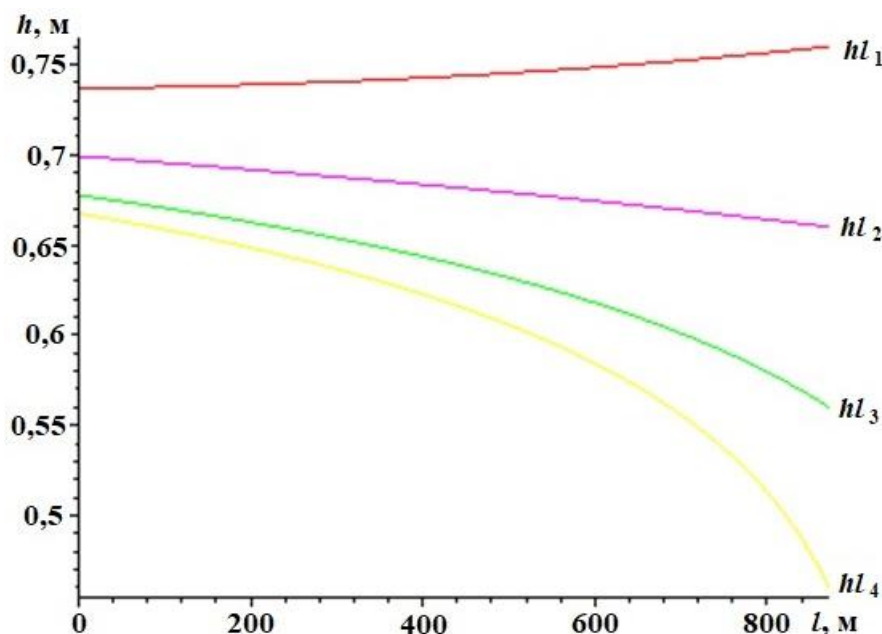


Рисунок 4 – Закономерности формирования свободной поверхности потоков в лотке для спектра стационарных режимов с расходом $Q = 0,40 \text{ м}^3/\text{с}$ (участок 4, уклон $i = 0,00021$)

Figure 4 – Patterns of formation of the free surface of flows in a flume for a spectrum of stationary modes with a flow rate of $Q = 0.40 \text{ м}^3/\text{с}$ (section 4, slope = 0.00021)

Проведенные исследования позволяют перейти к наиболее ценному, с практической точки зрения эксплуатации оросительных систем расчету: вычисление объемов воды на участках экспериментального канала с применением разработанных моделей кривых для условий стационарных и нестационарных течений.

Установлен спектр регулируемых величин наполнения в конце участков 2 и 3 (трапецеидальный профиль поперечного сечения) и 4–6 (лотковая сеть); определены и сопоставлены объемы $W_i(Q, hl_i)$, hl_i ($i = 1, 2K$), рассчитанные двумя способами (уравнения (10), (11)):

$$W_i(Q, hl_i) = (\omega(Q, hl_i, 0) + \omega(Q, hl_i, l)) / 2, \quad (10)$$

где l – конечный створ;

0 – начальный створ канала;

$$W_i(Q, hl_i) = \int_0^l \omega(Q, hl_i, x) dx. \quad (11)$$

Расчет по уравнению (11) выполняется на основе реализации квадратурных формул Гаусса. Ход интегрирования зависит от заданной точности, в нашем случае – семь значимых цифр.

Относительные отклонения результатов двух способов расчета объемов $W_i(Q, hl_i)$ определяется по уравнению (12):

$$\Delta = \frac{\sqrt{(\sum W_i - W_i')^2 / n}}{W_{\text{CP}}} \cdot 100 \%, \quad (12)$$

где W_i и W_i' – расчетные объемы, полученные по уравнениям (11) и (12) соответственно, м^3 ;

W_{CP} – средний объем заданного участка, определяемый с помощью кривой водной поверхности, м^3 .

В результате сравнительного расчета в таблице 3 приведены относительные отклонения значений объемов воды на участках канала 1 и 4 для условий различных расходов.

Таблица 3 – Значения относительных отклонений объемов воды на участках канала 1 и 4 для условий различных расходов
Table 3 – Values of relative deviations in water volumes in sections of canal 1 and 4 for different flow rates

Расход на участке 1 $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Относительное отклонение $\Delta, \%$	Максимальное относительное отклонение $\Delta_{\text{max}}, \%$	Расход на участке 4 $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Относительное отклонение $\Delta, \%$	Максимальное относительное отклонение $\Delta_{\text{max}}, \%$
2,4	13,4	27,1	0,8	10,6	18,5
2,2	10,8	22,5	0,7	7,2	13,1
1,9	9,3	20,6	0,15	20,0	21,5
1,3	8,9	18,4	–	–	–
0,94	6,8	17,2	–	–	–
Примечание – максимальное относительное отклонение ($\Delta_{\text{max}}, \%$) рассчитано по формуле (12), однако была использована выборка данных двух рассматриваемых способов: с наибольшими и наименьшими значениями в одних и тех же точках соответственно.					

Анализ данных таблицы 3 показывает, что на участке 1 (трапецидальный профиль поперечного сечения) при расчетном расходе ($Q, \text{ м}^3/\text{с}$) от 0,94 до 2,4 $\text{м}^3/\text{с}$ относительное отклонение ($\Delta, \%$) составило от 6,8 до 13,4 % с максимальными значениями от 17,2 до 27,1 % соответственно; на участке 4 (лотковая сеть) при расчетном расходе ($Q, \text{ м}^3/\text{с}$) от 0,15 до 0,8 $\text{м}^3/\text{с}$ относительное отклонение ($\Delta, \%$) составило от 7,2 до 20,0 % с максимальными значениями ($\Delta_{\text{max}}, \%$) от 13,1 до 21,5 % соответственно. Следует отметить общую закономерность изменения относительного ($\Delta, \%$) и максимального относительного отклонения ($\Delta_{\text{max}}, \%$): при увеличении расхода ($Q, \text{ м}^3/\text{с}$) относительное ($\Delta, \%$) и максимальное относительное отклонение ($\Delta_{\text{max}}, \%$) увеличивается, однако при значительном снижении расходной характеристики ($Q, \text{ м}^3/\text{с}$) (более чем на 80 %) в условиях лотковой сети (участок 4) относительное ($\Delta, \%$) и максимальное относительное отклонение ($\Delta_{\text{max}}, \%$) увеличивается до наивысших значений. Это в свою очередь диктует требование установления диапазонных значений для соответствия показателей точности рассчитываемых гидродинамических характеристик каналов оросительных систем в условиях выполнения задач оперативного диспетчерского управления водораспределением.

Выводы. В результате проведенных исследований на участках Миусской оросительной системы установлен вид кривых водной поверхности, а также пределы изменения основных гидродинамических характеристик с учетом диапазона их регулирования для условий выполнения задач оперативного диспетчерского управления водораспределением.

Моделирование величин объемов воды с применением кривых свободной поверхности и приближенного метода учета объемов на входе и конце расчетного участка показало существенные отклонения. В этом ключе следует дополнить расчеты объемов $W_i(Q, h_{li})$, проводимые путем создания кривых свободной поверхности, методом численного интегрирования (формула (11)).

Имея совокупность функций объемов воды $W_i(Q, h_{li})$ и величин наполнения потока $h_i(Q, h_{li})$ по длине участка оросительной системы, вычисляемых по всей иерархии системы, можно создать устойчивую основу или информационную базу данных, используемых для автоматизации элементов диспетчерского управления при водораспределении. Это позволило разработать новые алгоритмы и компьютерную программу на базе использования информационных технологий, математического моделирования, методов системного анализа, теории оптимальных решений, которые по факту своего внедрения в действующую сеть оросительных каналов обеспечили значительное повышение производительности труда по сравнению с ручным счетом, повысили эффективность использования водных и энергетических ресурсов на 10–15 %, оптимизировали процессы систем сбора, обработки и передачи информации.

Список источников

1. Юрченко И. Ф. Планирование системного водораспределения: современное состояние и приоритетные направления совершенствования // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 1. С. 184–199. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-184-199. EDN: CUPZJN.
2. A path towards precision border irrigation combining hydrodynamic modelling and in-field sensor-based support / P. Vandôme, G. Belaud, M. A. Berkaoui, C. Guillemin,

F. Charron, C. Leauthaud // *Agricultural Water Management*. 2025. Vol. 316. Article number: 109518. DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109518.

3. Hydrodynamic modelling to develop design and operational options for sedimentation reduction in irrigation schemes, Ethiopia / Z. A. Gurmu, H. Ritzema, Ch. Fraiture, M. Ayana // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2024. Vol. 53. Article number: 101816. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101816. EDN: GASKCQ.

4. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: информ. изд. / Г. В. Ольгаренко, С. С. Турапин, В. И. Булгаков, Т. А. Капустина, Н. А. Мищенко, М. С. Зверьков, Л. Е. Паутова, А. В. Грушин, Е. В. Медведева, А. И. Банникова, И. Д. Сосновских. М.: Росинформагротех, 2020. 304 с. ISBN: 978-5-7367-1593-0. EDN: AVWQXO.

5. Использование мобильных IT-приложений для решения задач водопользования на внутрихозяйственной оросительной сети / Е. А. Волкова, Д. А. Кудравец, В. И. Коржов, И. В. Коржов // *Мелиорация и гидротехника*. 2023. Т. 13, № 3. С. 30–47. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-30-47. EDN: WCHPQE.

6. Multi-objective modeling and optimization of water distribution for canal system considering irrigation coverage in artesian irrigation district / Z. Mai, Yu. He, Ch. Feng, C. Han, Yu. Shi, W. Qi // *Agricultural Water Management*. 2024. Vol. 301. Article number: 108959. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108959. EDN: ETQZZA.

7. Promoting precision surface irrigation through hydrodynamic modelling and microtopographic survey / C. Costanzo, P. Costabile, F. Gangi, G. Argirò, E. Bautista, C. Gandolfi, D. Masseroni // *Agricultural Water Management*. 2024. Vol. 301. Article number: 108950. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108950. EDN: QXGYMM.

8. Методология влияния свободной порозности и водоотдачи на процессы, происходящие в почвогрунтах оросительных каналов с земляным руслом / О. В. Михеева, А. В. Кравчук, С. С. Орлова, Е. Н. Миркина, Т. А. Панкова // *Природообустройство*. 2024. № 1. С. 12–17. DOI: 10.26897/1997601120241-12-17. EDN: VQQBMF.

9. Ольгаренко В. И., Ольгаренко Г. В., Ольгаренко И. В. Оптимизация процессов водопользования на основе методологии ландшафтно-экологического подхода: монография. Новочеркасск: Лик, 2019. 623 с. ISBN: 978-5-907158-42-9. EDN: UZWMWT.

References

1. Yurchenko I.F., 2023. *Planirovanie sistemnogo vodoraspredeleniya: sovremennoe sostoyanie i prioritetye napravleniya sovershenstvovaniya* [System water distribution planning: modern state and priority areas for improvement]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 1, pp. 184-199, DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-184-199, EDN: CUPZJN. (In Russian).

2. Vandôme P., Belaud G., Berkaoui M.A., Guillemain C., Charron F., Leauthaud C., 2025. A path towards precision border irrigation combining hydrodynamic modelling and in-field sensor-based support. *Agricultural Water Management*, vol. 316, article number: 109518, DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109518.

3. Gurmu Z.A., Ritzema H., Fraiture Ch., Ayana M., 2024. Hydrodynamic modelling to develop design and operational options for sedimentation reduction in irrigation schemes, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 53, article number: 101816, DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101816, EDN: GASKCQ.

4. Olgarenko G.V., Turapin S.S., Bulgakov V.I., Kapustina T.A., Mishchenko N.A., Zverkov M.S., Pautova L.E., Grushin A.V., Medvedeva E.V., Bannikova A.I., Sosnovskikh I.D., 2020. *Meliorativnyy kompleks Rossiyskoy Federatsii: inform. izd.* [Land Reclamation Complex of the Russian Federation: information publ.]. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 304 p., ISBN: 978-5-7367-1593-0, EDN: AVWQXO. (In Russian).

5. Volkova E.A., Kudravets D.A., Korzhov V.I., Korzhov I.V., 2023. *Ispol'zovanie*

mobil'nykh IT-prilozheniy dlya resheniya zadach vodopol'zovaniya na vnutrikhozyaystvennoy orositel'noy seti [Using mobile IT applications for solving water use problems in the on-farm irrigation network]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 3, pp. 30-47, DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-30-47, EDN: WCHPQE. (In Russian).

6. Mai Z., He Yu., Feng Ch., Han C., Shi Yu., Qi W., 2024. Multi-objective modeling and optimization of water distribution for canal system considering irrigation coverage in artesian irrigation district. *Agricultural Water Management*, vol. 301, article number: 108959, DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108959, EDN: ETQZZA.

7. Costanzo C., Costabile P., Gangi F., Argirò G., Bautista E., Gandolfi C., Masseroni D., 2024. Promoting precision surface irrigation through hydrodynamic modelling and microtopographic survey. *Agricultural Water Management*, vol. 301, article number: 108950, DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108950, EDN: QXGYMM.

8. Mikheeva O.V., Kravchuk A.V., Orlova S.S., Mirkina E.N., Pankova T.A., 2024. *Metodologiya vliyaniya svobodnoy poroznosti i vodootdachi na protsessy, proiskhodyashchie v pochvogruntakh orositel'nykh kanalov s zemlyanym ruslom* [Methodology of influence of free porosity and water loss on the processes occurring in the soils of irrigation channel with an earth bed]. *Prirodoobustroytvo* [Environmental Engineering], no. 1, pp. 12-17, DOI: 10.26897/1997601120241-12-17, EDN: VQQBMF. (In Russian).

9. Olgarenko V.I., Olgarenko G.V., Olgarenko I.V., 2019. *Optimizatsiya protsessov vodopol'zovaniya na osnove metodologii landshaftno-ekologicheskogo podkhoda: monografiya* [Optimization of Water Use Processes Based on the Methodology of the Landscape-Ecological Approach: monograph]. Novocherkassk, Lik Publ., 623 p., ISBN: 978-5-907158-42-9, EDN: UZWMWT. (In Russian).

Информация об авторах

И. В. Ольгаренко – заместитель директора по науке и инновациям, доктор технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета (346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, д. 111), nimi-info@yandex.ru, AuthorID: 400173, ORCID: 0000-0002-4865-5642;

В. И. Ольгаренко – профессор кафедры, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Заслуженный деятель науки РФ, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета (346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, д. 111), nimi-info@yandex.ru, AuthorID: 580234, ORCID: 0000-0003-4399-997X;

А. В. Колганов – главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр-кт Баклановский, д. 190), kolganov49@mail.ru, AuthorID: 347268, ORCID: 0000-0003-0234-0079;

В. Иг. Ольгаренко – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр-кт Баклановский, д. 190), olgarenko_vi@mail.ru, AuthorID: 653085, ORCID: 0000-0002-9609-5571.

Information about the authors

I. V. Olgarenko – Deputy Director for Science and Innovation, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A. K. Kortunov – branch of the Don State Agrarian University (346428, Rostov Region, Novocherkassk, Pushkinskaya Street, 111), nimi-info@yandex.ru, AuthorID: 400173, ORCID: 0000-0002-4865-5642;

V. I. Olgarenko – Professor of the Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A. K. Kortunov – branch of the Don State Agrarian University (346428, Rostov Region, Novocherkassk, Pushkinskaya Street, 111), nimi-info@yandex.ru, AuthorID: 580234, ORCID: 0000-0003-4399-997X;

A. V. Kolganov – Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov Region, Novocherkassk, Baklanovsky Avenue, 190), kolganov49@mail.ru, AuthorID: 347268, ORCID: 0000-0003-0234-0079;

V. Ig. Olgarenko – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov Region, Novocherkassk, Baklanovsky Avenue, 190), olgarenko_vi@mail.ru, AuthorID: 653085, ORCID: 0000-0002-9609-5571.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 15.09.2025; одобрена после рецензирования 17.12.2025;
принята к публикации 22.12.2025.*

The article was submitted 15.09.2025; approved after reviewing 17.12.2025; accepted for publication 22.12.2025.