

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 628.16.067.1:532.546

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-256-273

**Исследование фильтрации из оросительного канала
методом электрогидродинамических аналогий**

Виктория Федоровна Талалаева¹, Елена Олеговна Скляренко²

¹Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

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

¹Vika-Silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

²SklyarenkoElen@yandex.ru

Аннотация. Цель: моделирование процесса фильтрации из оросительного канала, выполненного в земляном русле. **Материалы и методы.** Одним из распространенных методов при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений является моделирование процесса фильтрации. На практике распространено применение математического моделирования, основанного на использовании математических аналогий различных физических процессов, которые описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями. Метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) базируется на аналогии между движением грунтовых вод и движением электрического тока и позволяет решать различные задачи фильтрации на моделях из электропроводных материалов. Целью моделирования движения грунтовых вод методом ЭГДА является создание модели, подобной натурному объекту, для изучения с ее помощью происходящих фильтрационных процессов. **Результаты.** Были построены гидродинамическая сетка и эпюра скоростей фильтрации, по которым исследовалась свободная фильтрация из канала в земляном русле. В результате исследования определены удельный фильтрационный расход, скорость фильтрации и проведено сопоставление со значениями, полученными расчетным путем. Сравнение результатов, полученных по гидродинамической сетке, с расчетной формулой показало, что их значения совпадают с погрешностью 1,26 %. Удельный расход, определенный расчетным методом, совпадает со значением по гидродинамической сетке для выделенного пояса равного давления с погрешностью 2,8 %. **Выводы:** метод ЭГДА позволяет эффективно определить фильтрационные потери воды из канала, однако при количественной оценке фильтрационного расхода он дает более существенные погрешности из-за сложности полного учета при моделировании реальных условий рассматриваемого объекта.

Ключевые слова: фильтрация, гидротехническое сооружение, оросительный канал, земляное русло, метод электрогидродинамических аналогий

Для цитирования: Талалаева В. Ф., Скляренко Е. О. Исследование фильтрации из оросительного канала методом электрогидродинамических аналогий // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 256–273. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-256-273>.

HYDRAULIC ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

Irrigation canal filtration study by electric analogy method

Viktoriya F. Talalaeva¹, Elena O. Sklyarenko²

¹Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

²Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹Vika-Silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

²SklyarenkoElen@yandex.ru

Abstract. Purpose: simulation of the filtration process from an irrigation canal made in an earthen channel. **Materials and methods.** One of the most common methods in the waterworks construction and operation is the filtration process modeling. In practice, the use of mathematical modeling based on the use of mathematical analogies of various physical processes, which are described by the same differential equations, is widespread. The electric analogy method (EGDA) is based on the analogy between the groundwater velocity and the electrical current flow and allows solving various filtration problems on models of electrically conductive materials. The purpose of modeling the groundwater velocity using the EGDA method is to develop a model similar to a full-scale object, for studying the ongoing filtration processes with its help. **Results.** A flow net and a filtration velocity profile which were used to study free filtration from a canal in an earthen channel were constructed. As a result of the study, the specific filtration flow rate, filtration rate were determined and a comparison with the values obtained by calculation was made. Comparison of the results obtained from the flow net with the calculation formula showed that their values coincide with an error of 1.26 %. The specific flow rate determined by the calculation method coincides with the flow net value for the selected belt of equal pressure with an error of 2.8 %. **Conclusions:** the EGDA method allows determine effectively the seepage water losses from the canal, however, when quantifying the seepage flow, it gives more significant errors due to the complexity of complete recording when modeling the real conditions of the object under consideration.

Keywords: filtration, waterworks, irrigation canal, earthen channel, electric analogy method

For citation: Talalaeva V. F., Sklyarenko E. O. Irrigation canal filtration study by electric analogy method. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):256–273. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-256-273>.

Введение. В современных условиях строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений изучение фильтрации является актуальной задачей. Одним из перспективных методов является моделирование процесса фильтрации. На практике распространено применение математического моделирования, основанного на использовании математических аналогий различных физических процессов, которые описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями [1].

В настоящее время известны различные методы математического моделирования, такие как: метод конечных элементов, дискретных элементов, а также методы гидродинамики сглаженных частиц. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, и выбор метода зависит от типа задачи, которая должна быть решена.

Существует большое количество программных комплексов для решения гидродинамических задач. Одним из передовых программных комплексов моделирования гидродинамических процессов на сегодняшний день является ANSYS Fluent, в основе которого лежит метод вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). В зарубежных исследованиях широко распространен метод вычислительной гидродинамики – метод дискретных элементов (Discrete element method, DEM), являющийся популярным в моделировании течений в сочетании с гидродинамическим методом. Метод представляет собой процесс, используемый для моделирования систем, сочетающих жидкости с твердыми веществами или частицами. DEM основан на законах движения Ньютона применительно к каждой частице, в то время как течение сплошной среды описывается локальными усредненными уравнениями Навье – Стокса, которые могут быть решены с использованием традиционной вычислительной гидродинамики. Моделирование течения жидкости и твердого тела в потоке является сложным процессом из-за порядкового различия величин между характерными шкалами, такими как скорость течения жидкости, размеры твердого тела, время воздействия и другие параметры. Все эти факторы влияют на процесс течения и требуют совокупности уравнений для быстрых и точных расчетов [2–4].

В данной работе рассмотрим классический экспериментальный метод исследования фильтрации – метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), являющийся экспериментальным методом решения уравнения Лапласа, основанный на аналогии между электромагнитными полями и

потоками жидкости. Изначально метод был применен Н. Н. Павловским для расчетов плотин в лаборатории фильтрационных исследований во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Далее этот метод был усовершенствован учеными для решения фильтрационных задач. Большой вклад в развитие метода ЭГДА внесли Н. И. Дружинин, В. Р. Булдей, П. Ф. Фильчаков, В. И. Панчишин и др. [5–7].

С целью проведения фильтрационных исследований были созданы лаборатории в ряде научно-исследовательских, проектных учреждений и вузов, таких как: Гидропроект, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, ВНИИ «ВОДГЕО», Южгипроводхоз, Севкавгипроводхоз, НИМИ им. А. К. Кортунова и др.

Метод ЭГДА широко применяется за рубежом (в Китае, Индии, Канаде, Франции и других странах) и по сегодняшний день. Например, в Индии в лаборатории гидродинамической аналогии при Научно-исследовательском институте ирригации (штат Уттар-Прадеш, г. Рурки) использовали пространственную модель ЭГДА для исследования фильтрации гидротехнических сооружений. Была проделана значительная работа по оценке характеристик наводнений и долгосрочного среднегодового стока с использованием регрессионных зависимостей [8, 9].

Результаты исследований в области моделирования фильтрации на гидротехнических сооружениях рассмотрены в работах: Ю. М. Косиченко, А. В. Ищенко, К. Н. Анахаева, А. Г. Баламирзоева, А. Н. Анискина, О. А. Баева и др. [10–17].

Моделирование процесса фильтрации возможно осуществить с помощью метода ЭГДА, т. е. аналогии между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и стационарным ламинарным движением фильтрационного потока. Применение метода ЭГДА позволяет построить гидродинамическую сетку движения, определить удельный фильтрационный расход.

Цель исследования заключалась в моделировании задачи безнапор-

ной фильтрации из оросительного канала Сарпинской обводнительно-оросительной системы (ООС) Калмыкии с использованием метода ЭГДА. Актуальность работы обусловлена дефицитом водных ресурсов и необходимостью повышения рациональности водопользования в регионе. Ввиду этого востребованным является определение фильтрационных потерь из необлицованных русел каналов ООС.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбран участок канала Сарпинской ООС, выполненный в земляном русле.

Сарпинская ООС находится в пределах Сарпинской низменности на территориях Волгоградской, Астраханской областей и Республики Калмыкия. Назначением Сарпинской ООС является орошение сельскохозяйственных угодий, обводнение пастбищ и подача воды в населенные пункты для водоснабжения. Оросительные каналы системы характеризуются значительными потерями воды на фильтрацию. На исследуемом участке канала (рисунок 1) обнаружены деформации русла от трапецеидального сечения к полигональному, процессы заиления дна канала (ввиду снижения скорости водного потока), зарастание откосов камышовой растительностью.



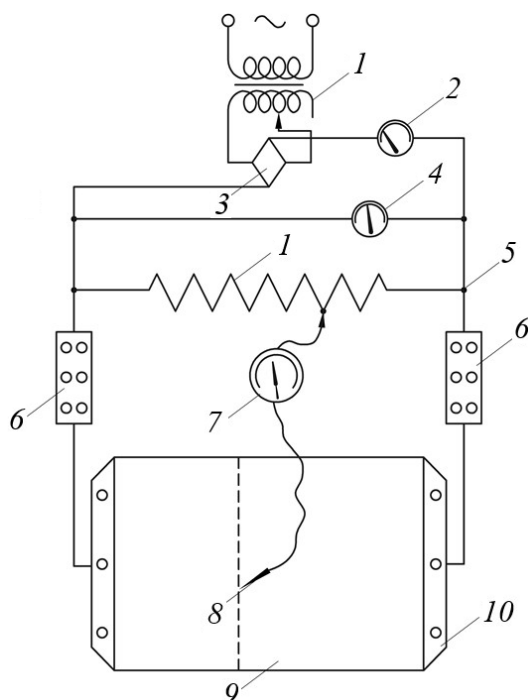
Рисунок 1 – Участок оросительного канала Сарпинской обводнительно-оросительной системы (автор фото В. Ф. Талалаева)
Figure 1 – Irrigation canal section of the Sarpinsky irrigation system (photo by V. F. Talalaeva)

С целью оценки фильтрационных потерь для одного из участков канала Сарпинской ООС были проведены экспериментальные исследования

методом ЭГДА. Экспериментально на модели из электропроводного материала (электропроводная бумага, электролит) можно решать различные фильтрационные задачи и исследовать другие виды потенциального движения жидкости.

Существует несколько технических решений приборов ЭГДА. В большинстве из них область фильтрации моделируется какими-либо жидкими или твердыми электролитами. На жидкостных приборах ЭГДА в основном исследуется пространственная фильтрация.

Действие установки ЭГДА основано на использовании при выполнении экспериментов мостового (компенсационного) метода измерений электрического потенциала в поле модели. Установка ЭГДА состоит из блока измерения и блока питания, принципиальная схема представлена на рисунке 2.



1 – трансформатор; 2 – миллиамперметр; 3 – выпрямитель; 4 – вольтметр;
5 – потенциометр; 6 – сопротивления; 7 – нуль-индикатор; 8 – поисковая
игла; 9 – модель; 10 – шины зажимные

1 – transformer; 2 – milliammeter; 3 – rectifier; 4 – voltmeter; 5 – potentiometer;
6 – resistance; 7 – null indicator; 8 – seeker needle; 9 – model; 10 – clamping bars

Рисунок 2 – Принципиальная схема установки ЭГДА

Figure 2 – Schematic diagram of the EGDA installation

Перед проведением исследований методом ЭГДА сначала составляют схему модели в выбранном масштабе. На схему наносят все элементы сооружения и отдельные слои основания. После модель в точности выполняют из различных сортов электропроводной бумаги. Сопротивление бумаги определяют омметром, для этого вырезают квадраты из электропроводной бумаги размерами 5×5 или 10×10 см, оставляя с двух сторон полосы шириной около 3 мм для прикрепления шин. Далее различные сорта бумаги или отдельные участки склеивают электропроводным клеем внахлест при ширине попуска одного листа бумаги на другой 2–3 мм.

Для задачи граничных условий на внутренних границах бумажных моделей приклеивают проволочные шины. Линейные шины используют для задачи переменного потенциала (напора). Шины выполняют из манганинового провода, плотно намотанного на изолированную проволоку. Для задачи граничных условий по сложному профилю с большой кривизной на внешних границах бумажных моделей применяют зажимные шины. Общий вид модели представлен на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Общий вид модели из электропроводной бумаги
(автор фото Е. О. Скляренко)**

**Figure 3 – General view of the model made of resistance paper
(photo by E. O. Sklyarenko)**

При проведении моделирования по методу ЭГДА используют фундаментальные дифференциальные уравнения установившегося движения грунтовых вод. Каждый параметр фильтрационного потока имеет аналог электрического тока, что позволяет экспериментальным путем на электрической модели определить характеристики потока в пористой среде. Далее при помощи масштабных коэффициентов значения аналогов переводятся в соответствующие фильтрационные характеристики [18].

Примеры физических аналогий между электрическим током и фильтрацией жидкости представлены в таблице 1 [19].

Таблица 1 – Физические аналогии между движением электрического тока и фильтрационным потоком

Table 1 – Physical analogies between the electric current flow and seepage flow

Электрический ток	Фильтрационный поток
Электрический потенциал U , В	Действующий напор H , м
Разность потенциалов: $\Delta U = U_1 - U_2$, В, где U_1, U_2 – электрический потенциал в точках 1 и 2 соответственно, В	Разность напоров: $\Delta H = H_1 - H_2$, м, где H_1, H_2 – значения напора в точках 1 и 2 соответственно, м
Длина проводника $l_{\text{пр}}$, м	Длина пути фильтрации l , м
Площадь сечения проводника F , м ²	Площадь сечения потока ω , м ²
Напряженность электрического поля: $E = \frac{dU}{dl_{\text{пр}}}$, В/м	Градиент напора: $I_n = \frac{dH}{dl}$, м
Коэффициент удельной проводимости: $C = \frac{1}{\rho}$, Ом·м, где ρ – удельное сопротивление проводника, Ом·м	Коэффициент фильтрации k , м/сут
Плотность тока i , А/м ²	Скорость фильтрации v , м/с
Закон Ома: $i = -C \frac{dU}{dl_{\text{пр}}}$, А/м ²	Закон Дарси: $v = -k \frac{dH}{dl}$, м/с
Сила тока: $I = CF \frac{\Delta U}{l_{\text{пр}}} = \frac{\Delta U}{R}$, А, где R – электрическое сопротивление проводника, Ом	Расход потока: $Q = k\omega \frac{\Delta H}{l}$, м ³ /с
Поверхность изолятора	Поверхность водоупора

Потенциальная функция φ и функция тока ψ для водного потока удовлетворяют уравнениям Лапласа, которые обычно относят к случаю напорной фильтрации без свободной поверхности:

$$\frac{\partial^2 \cdot \varphi}{\partial \cdot x^2} + \frac{\partial^2 \cdot \varphi}{\partial \cdot y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \cdot \psi}{\partial \cdot x^2} + \frac{\partial^2 \cdot \psi}{\partial \cdot y^2} = 0,$$

x, y – координаты поверхности.

Линии равных напоров, представляющие живые сечения фильтрационного потока, являются эквипотенциальными линиями, и их уравнения выражают в виде:

$$\varphi(x, y) = \text{const}.$$

Линии тока определяются как:

$$\psi(x, y) = \text{const}.$$

Семейство линий равного напора и семейство линий тока в совокупности образуют гидродинамическую сетку движения фильтрационного потока. Если фильтрационный поток является безнапорным со свободной поверхностью, то движение грунтового потока описывают уравнением Форхгеймера в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 \cdot h^2}{\partial \cdot x^2} = 0,$$

где h – глубина грунтового потока, м.

Основные аналоги фильтрационного потока и электрического поля определяют сопоставлением основных законов движения фильтрационного и электрического потоков, используя выражение расхода фильтрационного потока Q , м³/с (закон Дарси):

$$Q = k\omega \frac{\Delta H}{l},$$

где k – коэффициент фильтрации слоя основания, м/сут;

ω – площадь сечения фильтрационного потока, м²;

ΔH – разность напоров между соседними эквипотенциалами, м;

l – длина пути фильтрации, м.

Для соответствующей силы тока I , А:

$$I = C\omega_m \frac{\Delta H}{l_m},$$

где C – коэффициент удельной проводимости материала модели, величина, обратная удельному сопротивлению материала модели, Ом·м;

ω_m – площадь модели, соответствующая площади сечения фильтрационного потока ω , м²;

l_m – длина элемента модели, соответствующая длине элемента l , м.

Электрический потенциал U с математической точки зрения рассматривают как функцию координат $U = f(x, y)$, играющую такую же роль в движении электрического тока, как и напорная функция h (или функция φ) в движении грунтовых вод.

Так же как и напор H , потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \cdot H}{\partial \cdot x^2} + \frac{\partial^2 \cdot U}{\partial \cdot y^2} = 0,$$

где H – пьезометрический напор, м.

Использование гидродинамической сетки основано на выделении в области фильтрации отдельных расчетных ячеек, близких к прямоугольной форме. Расчеты расхода проводят в границах ячейки по известным формулам напорного или безнапорного фильтрационного потока.

При постановке опытов находят экспериментальные решения для подобной задачи, а затем при помощи простых переходных формул их распространяют на гидродинамическую задачу. Таким образом, исследование вопросов фильтрации сводят к изучению соответствующих (аналогичных) электрических процессов и параметров на электрических моделях и результаты этих исследований распространяют на процессы фильтрации.

Результаты и обсуждение. Исследуемая область фильтрации вычерчена в масштабе 1:100 на электропроводной бумаге и вырезана по параметрам модели. Так как уровень грунтовых вод, залегающих в более водопроницаемом слое грунта, находится на значительной глубине, то разность уровня воды в канале и границы проницаемого слоя принимаем за 100 %.

В соответствии со схемой модели по граничным линиям равного напора были установлены соответствующие шины. По смоченному периметру канала шина $\Pi_1 = 100\%$, по водоупору – шина $\Pi_2 = 0\%$.

Расстояние (между уровнем воды в канале и границей проницаемого слоя) было разбито на 10 равных частей, и через эти точки проведены изогнутые линии равных напоров $\varphi = 90\%$, $\varphi = 80\%$ и т. д. Для канала в земляном русле построена гидродинамическая сетка в масштабе 1:100 (рисунок 4а) и эпюра скоростей фильтрации (рисунок 4б).

Задаваясь исходными данными, по построенной гидродинамической сетке находим удельный расход и скорость фильтрации на примере участка оросительного канала Сарпинской обводнительно-оросительной сети.

Исходные данные: канал в земляном русле трапецеидального сечения; ширина канала по дну $b = 2$ м; глубина воды в канале $h_0 = 1,5$ м; коэффициент заложения откосов $m = 1,5$; коэффициент фильтрации грунта основания $k = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м/с; глубина залегания водоупора $T = 15$ м.

Удельный фильтрационный расход (q'_ϕ , м²/с) по гидродинамической сетке определяем по формуле:

$$q'_\phi = k \cdot \Delta h \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l_i}{\Delta S_i}, \quad (1)$$

где k – коэффициент фильтрации, м/с;

Δh – потери напора на рассматриваемом поясе ($\Delta h = 0,1H = 0,1T$, м, где H – действующий напор);

n – количество поясов;

Δl_i – средняя высота криволинейного квадрата гидродинамической сетки, м;

ΔS_i – средняя ширина криволинейного квадрата гидродинамической сетки, м.

Удельный фильтрационный расход определяем на глубине T , м²/с:

$$q_{\phi} = k(B_k + 2h_0), \quad (2)$$

где B_k – ширина канала по верху, м, $B_k = b + 2mh_0$.

Максимальные и минимальные скорости фильтрации (V_i , м/с) в точках 2, 3 и 1, 4 (рисунок 4b) вычисляем по формуле, м/с:

$$V_i = -k \frac{\Delta h}{\Delta S_i}. \quad (3)$$

Для расчета был принят пояс равного напора (в рассматриваемом примере – шестой).

Подставляя исходные данные в формулы (1)–(3), получим:

$$q'_{\phi} = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{1,15}{1,10} + \frac{1,25}{1,15} + \frac{1,30}{1,15} + \frac{1,30}{1,15} + \frac{1,25}{1,15} + \frac{1,15}{1,10} \right) = 11,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

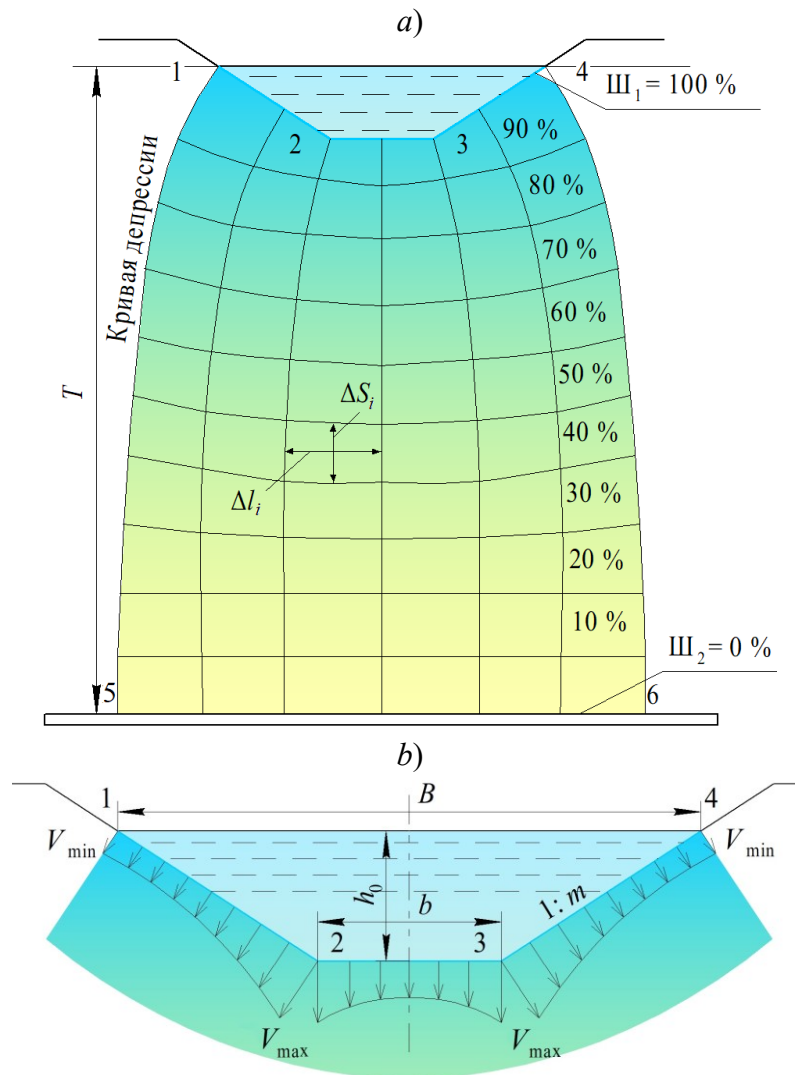
$$q_{\phi} = 1,2 \cdot 10^{-6} (6,5 + 2 \cdot 1,5) = 11,40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$V_{\max} = V_{2,3} = -k \frac{\Delta h}{\Delta S_{2,3}} = -1,2 \cdot 10^{-6} \frac{1,5}{1,0} = -1,80 \cdot 10^{-6} \text{ м/с},$$

где $\Delta S_{2,3}$ – средняя ширина квадратов гидродинамической сетки на участках 2 и 3, м;

$$V_{\min} = V_{1,4} = -k \frac{\Delta h}{\Delta S_{1,4}} = -1,2 \cdot 10^{-6} \frac{1,5}{1,3} = -1,38 \cdot 10^{-6} \text{ м/с},$$

где $\Delta S_{1,4}$ – средняя ширина квадратов гидродинамической сетки на участках 1 и 4, м.



a – гидродинамическая сетка; *b* – эпюра скоростей фильтрации; 1, 2, 3, 4 – точки граничной линии канала; 5, 6 – точки граничной эквипотенциальной поверхности;

Δl_i – средняя высота криволинейного квадрата гидродинамической сетки, м;

ΔS_i – средняя ширина криволинейного квадрата гидродинамической сетки, м;

T – глубина залегания водоупора, м; h_0 – глубина воды, м; B – ширина по верху, м;

b – ширина по дну, м; V_{\max} , V_{\min} – максимальные и минимальные скорости фильтрации в точках 2, 3 и 1, 4 соответственно, м/с

a – flow net; *b* – filtration velocity profile; 1, 2, 3, 4 – points of the boundary line of the canal; 5, 6 – points of the boundary equipotential surface; Δl_i – the average height of the curvilinear square of the flow net, m; ΔS_i – the average width of the curvilinear square of the flow net, m;

T – the depth of the aquiclude, m; h_0 – water depth, m; B – top width, m; b – bottom width, m;

V_{\max} , V_{\min} – the maximum and minimum filtration rates at points 2, 3 and

1, 4 respectively, m/s

Рисунок 4 – Гидродинамическая сетка и эпюра скоростей фильтрации по периметру канала

Figure 4 – Flow net and filtration velocity profile around the channel perimeter

Определим фильтрационные потери воды Q_{ϕ} , м³/с, из канала в земляном русле (при $B_k/h_0 = 6,5/1,5 = 4,3 > 4$) по формуле В. В. Ведерникова:

$$Q_{\phi} = 0,0116 \cdot k \cdot (B_k + A \cdot h_0), \quad (4)$$

где A – коэффициент, определяемый по таблице У.1¹ (при $B_k/h_0 = 4,3$ и $m = 1,5$ коэффициент $A = 2,3$).

$$Q_{\phi} = 0,0116 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot (6,5 + 2,3 \cdot 1,5) = 0,01188 \text{ м}^3/\text{с} = 11,88 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Вычисленный по формулам удельный расход сравнивают с расходом, определенным по гидродинамической сетке. Полученные значения по формуле (4) совпадают в пределах точности построения гидродинамической сетки ($11,88 \cdot 10^{-6} \approx 11,73 \cdot 10^{-6}$, погрешность составляет 1,26 %). Удельный фильтрационный расход, полученный по формуле (2), близко совпадает со значением, определенным по гидродинамической сетке ($11,40 \cdot 10^{-6} \approx 11,73 \cdot 10^{-6}$, погрешность 2,8 %).

Выводы

1 С целью оценки потерь воды на фильтрацию из канала в земляном русле был выбран метод аналогового моделирования (ЭГДА), заключающийся в аналогии между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и стационарным ламинарным движением фильтрационного потока. Метод ЭГДА позволяет определить фильтрационные потери воды из канала, однако при количественной оценке фильтрационного расхода он дает некоторые погрешности из-за сложности полного учета при моделировании реальных условий рассматриваемого объекта.

2 Сравнение результатов, полученных по гидродинамической сетке, с расчетной формулой В. В. Ведерникова показало, что эти значения сов-

¹Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85: СП 100.13330.2016 (с изм. № 1): утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 16.12.16: введ. в действие с 17.06.17. М.: Стандартинформ, 2017. 231 с.

падают в пределах точности построения гидродинамической сетки ($11,88 \cdot 10^{-6} \approx 11,73 \cdot 10^{-6}$, погрешность 1,26 %). Удельный расход на глубине T совпадает с его значением, определенным по гидродинамической сетке для выделенного пояса равного давления ($11,40 \cdot 10^{-6} \approx 11,73 \cdot 10^{-6}$ с погрешностью 2,8 %).

3 Отклонение результатов расчета объясняется неучетом неустановившегося характера фильтрации из канала, неполным учетом идентичных граничных условий и принятием различных значений модулей инфильтрационного питания, которые могут измениться в широком диапазоне.

Список источников

1. Развитие методов моделирования фильтрации при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений / О. Н. Котлов, Л. А. Фролова, Ю. Ю. Савельева, Ю. Г. Козуб, И. Н. Гусакова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2021. Т. 300. С. 43–57.
2. Tao R., Yang M., Li. S. Filtration of micro-particles within multi-fiber arrays by adhesive DEM-CFD simulation // Journal of Zhejiang University: Science A. 2018. Vol. 19(1). P. 34–44. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1700156>.
3. Possibilities and limits of computational fluid dynamics – discrete element method simulations in process engineering: a review of recent advancements and future trends / P. Kieckhefen, S. Pietsch, M. Dosta, S. Heinrich // Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2020. Vol. 11. P. 397–422. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-110519-075414>.
4. Опалев А. С., Паливода А. А. Моделирование системы жидкость – твердые частицы при сопряженном решении задачи в Rocky Dem и Ansys Fluent // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. Т. 12-1. С. 78–93. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_78.
5. Фильчаков П. Ф., Панчишин В. И. Интеграторы ЭГДА, моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге. Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 244 с.
6. Дружинин Н. И. Изучение региональных потоков подземных вод методом электрогидродинамических аналогий. М.: Недра, 1966. 123 с.
7. Булдей В. Р. Моделирование гидромелиоративных систем. Киев: Наукова думка, 1975. 253 с.
8. Umar N. Sources of irrigation in the state of Uttar Pradesh: A regional analysis // International Journal of Applied Research. 2020. Vol. 6(10). P. 984–993. <https://doi.org/10.22271/allresearch.2020.v6.i10o.7681>.
9. Jha R., Smakhtin V. A review of methods of hydrological estimation at ungauged sites in India / International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka, 2008. 28 p.
10. Ищенко А. В., Вишнеvский В. В. Расчеты и исследования аварийных ситуаций противofильтрационных устройств каменно-земляной плотины // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2005. Т. 7, № 4. С. 415–428.
11. Расчет фильтрации в земляной плотине на проницаемом основании с противо-

фильтрационной диафрагмой / К. Н. Анахаев, Н. А. Анискин, Б. Х. Амшоков, Х. К. Анахаева // Гидротехническое строительство. 2017. № 7. С. 42–47.

12. Баламирзоев А. Г. Методика расчета фильтрационной безопасности гидротехнических сооружений на трещиноватом загипсованном основании // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2005. № 4(132). С. 86–90.

13. Бестужева А. С., Анахаев К. К. О фильтрации через однородную грунтовую плотину с замком на водопроницаемом основании // Гидротехническое строительство. 2020. № 1. С. 35–42.

14. Косиченко Ю. М., Угроватова Е. Г., Баев О. А. Обоснование расчетных зависимостей фильтрационных сопротивлений конструкций облицовок каналов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2015. Т. 278. С. 35–46.

15. Колганов А. В., Баев О. А., Бакланова Д. В. Результаты натурных исследований магистрального канала в Республике Калмыкия // Природообустройство. 2022. № 3. С. 108–114. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-3-108-114>.

16. Расчет подпора грунтовых вод междуречного массива при неустановившейся фильтрации из водохранилища / Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова, О. А. Баев, М. Ю. Косиченко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2014. № 3(15). С. 120–138. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=739> (дата обращения: 12.04.2023).

17. Modeling of filtration flows under hydraulic engineering structures / G. I. Sidorenko, I. Togo, M. A. Mikhalev, R. A. Izmaylov, V. N. Boronin // Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. 12(75). P. 68–75. <https://doi.org/10.18720/CUBS.75.3>.

18. Фильтрационные течения в пористых средах: монография / Е. И. Коленкина, В. Ф. Никитин, О. А. Логвинов, Н. Н. Смирнов. М.: Изд-во ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2020. 73 с.

19. Сологаев В. И. Применение аналогии фильтрации и электричества при моделировании защиты от подтопления в городском строительстве // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 4(80). С. 450–462. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-450-462>.

References

1. Kotlov O.N., Frolova L.A., Savelyeva Yu.Yu., Kozub Yu.G., Gusakova I.N., 2021. *Razvitie metodov modelirovaniya fil'tratsii pri proektirovanii i ekspluatatsii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Development of filtration modeling methods for design and operation of hydraulic structures]. *Izvestiya VNIIG imeni B. E. Vedeneeva* [Proc. of the VNIIG named after B. E. Vedeneev], vol. 300, pp. 43-57. (In Russian).

2. Tao R., Yang M., Li S., 2018. Filtration of micro-particles within multi-fiber arrays by adhesive DEM-CFD simulation. *Journal of Zhejiang University: Science A*, vol. 19(1), pp. 34-44, <https://doi.org/10.1631/jzus.A1700156>.

3. Kieckhefen P., Pietsch S., Dosta M., Heinrich S., 2020. Possibilities and limits of computational fluid dynamics – discrete element method simulations in process engineering: a review of recent advancements and future trends. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, vol. 11, pp. 397-422, <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-110519-075414>.

4. Opalev A.S., Palivoda A.A., 2022. *Modelirovanie sistemy zhidkost' – tverdye chastitsy pri sopryazhennom reshenii zadachi v Rocky Dem i Ansys Fluent* [Modeling of the liquid-solid particle system in the coupling solution of the task in Rocky Dem and Ansys Fluent]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], vol. 12-1, pp. 78-93, https://doi.org/10.25018/02_36_1493_2022_121_0_78. (In Russian).

5. Filchakov P.F., Panchishin V.I., 1961. *Integratory EGDA, modelirovanie potentsi-*

alnykh poley na elektroprovodnoy bumage [Integrators EHDA, Modeling of Potential Fields on the Conductive Paper]. Kyiv, AN Ukrainian SSR Publ., 244 p. (In Russian).

6. Druzhinin N.I., 1966. *Izuchenie regionalnykh potokov podzemnykh vod metodom elektrogidrodinamicheskikh analogiy* [The Study of the Regional Groundwater Flow by Electrohydrodynamic Analogy Method]. Moscow, Nedra Publ., 123 p. (In Russian).

7. Buldey V.R., 1975. *Modelirovanie gidromeliorativnykh sistem* [Modeling Irrigation Systems]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 253 p. (In Russian).

8. Umar N., 2020. Sources of irrigation in the state of Uttar Pradesh: A regional analysis. *International Journal of Applied Research*, vol. 6(10), pp. 984-993, <https://doi.org/10.22271/allresearch.2020.v6.i10o.7681>.

9. Jha R., Smakhtin V., 2008. A review of methods of hydrological estimation at ungauged sites in India. *International Water Management Institute*, Colombo, Sri Lanka, 28 p.

10. Ishchenko A.V., Vishnevsky V.V., 2005. *Raschety i issledovaniya avariynykh situatsiy protivofil'tratsionnykh ustroystv kamenno-zemlyanoy plotiny* [Calculations and studies of emergency situations of impervious devices of a rock-and-earth dam]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], vol. 7, no. 4, pp. 415-428. (In Russian).

11. Anakhaev K.N., Aniskin N.A., Amshokov B.Kh., Anakhaeva Kh.K., 2017. *Raschet fil'tratsii v zemlyanoy plotine na pronitsaemom osnovanii s protivofil'tratsionnoy diafragmoy* [Calculation of filtration in earth dam with impervious diaphragms on permeable foundations]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 7, pp. 42-47. (In Russian).

12. Balamirzoev A.G., 2005. *Metodika rascheta fil'tratsionnoy bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na treshchinovatom zagipsovannom osnovanii* [The method of calculating the filtration safety of hydro-technical structures on a cracked gypsum base]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Technical Science], no. 4(132), pp. 86-90. (In Russian).

13. Bestuzheva A.S., Anakhaev K.K., 2020. *O fil'tratsii cherez odnorodnyuyu gruntovuyu plotinu s zamkom na vodopronitsaemom osnovanii* [Seepage through a homogeneous earth-fill dam with a cut-off wall on a permeable foundation]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 1, pp. 35-42. (In Russian).

14. Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G., Baev O.A., 2015. *Obosnovanie raschetnykh zavisimostey fil'tratsionnykh soprotivleniy konstruktivnykh oblitsovok kanalov* [Justification of the calculated dependences of seepage resistances of channel lining structures]. *Izvestiya VNIIG imeni B. E. Vedeneeva* [Proc. of the VNIIG named after B.E. Vedeneev], vol. 278, pp. 35-46. (In Russian).

15. Kolganov A.V., Baev O.A., Baklanova D.V., 2022. *Rezultaty naturnykh issledovaniy magistral'nogo kanala v Respublike Kalmykiya* [Results of field studies of the main canal in the Republic of Kalmykia]. *Prirodobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 108-114, <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-3-108-114>. (In Russian).

16. Kosichenko Yu.M., Baklanova D.V., Baev O.A., Kosichenko M.Yu., 2014. [Calculating groundwater head of between-rivers massif under unsteady filtration from reservoir]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 3(15), pp. 120-138, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=739> [accessed 12.04.2023]. (In Russian).

17. Sidorenko G.I., Togo I., Mikhalev M.A., Izmaylov R.A., Boronin V.N., 2018. Modeling of filtration flows under hydraulic engineering structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 12(75), pp. 68-75, <https://doi.org/10.18720/CUBS.75.3>.

18. Kolenkina E.I., Nikitin V.F., Logvinov O.A., Smirnov N.N., 2020. *Fil'tratsionnyye techeniya v poristyykh sredakh: monografiya* [Filtration Flows in Porous Medium: monograph]. Moscow, FGU FNTs NIISI RAN Publ., 73 p. (In Russian).

19. Sologayev V.I., 2021. *Primenenie analogii fil'tratsii i elektrichestva pri modelirovani zashchity ot podtopleniya v gorodskom stroitel'stve* [Use of filtration and electricity analogy in simulation of underflooding protection in urban construction]. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], vol. 18, no. 4(80), pp. 450-462, <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-450-462>. (In Russian).

Информация об авторах

В. Ф. Талалаева – младший научный сотрудник;

Е. О. Складенко – доцент, кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

V. F. Talalaeva – Junior Researcher;

E. O. Sklyarenko – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата,
самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical
violations in scientific publications.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 17.05.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023;
принята к публикации 05.07.2023.*

*The article was submitted 17.05.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for
publication 05.07.2023.*