

DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.05

УДК 696.1

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ В УСЛОВИЯХ ПОДТОПЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК С ОГРАЖДЕНИЯМИ

**В.И. Сологаев**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 27 июня 2022  
Одобрена: 26 августа 2022  
Принята к публикации:  
15 сентября 2022

#### Ключевые слова:

подтопление, фильтрационные расчеты, строительные выработки, искусственные неоднородности, городское строительство.

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены три распространенные расчетные фильтрационные схемы при проведении земляных работ в условиях подтопления в городском строительстве, в которых имеются характерные участки искусственных неоднородностей в виде различных креплений или конструкций. Произведена исходная постановка соответствующих фильтрационных задач. Поставлены граничные и начальные условия для областей фильтрации подземных вод. Решение задач найдено с применением методов конформных отображений, эквивалентных фильтрационных сопротивлений и интегральных преобразований Лапласа в нестационарной постановке движения подземных вод. Найдены достаточно удобные и не очень сложные формулы для расчета реальных процессов фильтрации подземных вод, которые образуют водопритоки в строительные выработки, ограниченные искусственными преградами, создающими препятствия для движения подземных вод. Полученные зависимости для расходов и напоров фильтрационных потоков при выполнении земляных работ носят оценочный характер, то есть достаточно приближенный, однако могут быть полезны в ходе проектирования земляных работ. Решения снабжены конкретными практическими примерами. Приведено сравнение напоров за контуром железобетонной стены в грунте в начальный период водоотливных работ в течение первых 10 сут. Рассмотрена нестационарная фильтрация подземных вод и поведение их уровня вблизи строительной выработки. Исследование показало, что недоучет наличия искусственной неоднородности при выполнении земляных работ с водоотливом приводит к слишком оптимистичному прогнозу снижения напора подземных вод вблизи строительных выработок. На самом деле напор снижается гораздо медленнее, что утяжеляет условия проведения земляных работ. Полученная усовершенствованная методика фильтрационных расчетов рекомендована к применению при выполнении земляных работ в городском строительстве.

© ПНИПУ

© Сологаев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: [sologayev\\_vi@cdo.sibadi.org](mailto:sologayev_vi@cdo.sibadi.org), ORCID: 0000-0002-2553-9892

Сологаев Валерий Иванович – Doctor of Technical Science, Professor, e-mail: [sologayev\\_vi@cdo.sibadi.org](mailto:sologayev_vi@cdo.sibadi.org), ORCID: 0000-0002-2553-9892

## IMPROVEMENT OF FILTRATION CALCULATIONS IN CONDITIONS OF UNDERFLOODING OF BUILDING WORKINGS WITH FENCES

V.I. Sologachev

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 27 June 2022  
Approved: 26 August 2022  
Accepted for publication:  
15 September 2022

#### Keywords:

underflooding, filtration calculations, construction workings, artificial inhomogeneities, urban construction.

### ABSTRACT

Three common design filtration schemes are considered during earthworks under flooding conditions in urban construction, in which there are characteristic areas of artificial heterogeneities in the form of various fixtures or structures. The initial formulation of the corresponding filtration problems has been made. Boundary and initial conditions for groundwater filtration areas are set. The solution of the problems was found using the methods of conformal mappings, equivalent filtration resistances and integral Laplace transformations in a non-stationary formulation of the movement of groundwater. Quite convenient and not very complicated formulas have been found for calculating the real processes of groundwater filtration, which form water inflows into construction workings, limited by artificial barriers that create obstacles for the movement of groundwater. The dependences obtained for the flow rates and pressures of seepage flows during earthworks are estimated, that is, quite approximate, but they can be useful in the design of earthworks. Solutions are provided with specific practical examples. A comparison is made of the pressure behind the contour of a reinforced concrete wall in the ground in the initial period of drainage work during the first 10 days. The non-stationary filtration of underground waters and the behavior of their level near the construction working are considered. The study showed that the underestimation of the presence of artificial heterogeneity during excavation with drainage leads to an overly optimistic forecast of a decrease in groundwater pressure near construction workings. In fact, the pressure decreases much more slowly, which makes excavation conditions more difficult. The improved method of filtration calculations obtained is recommended for use in earthworks in urban construction.

© PNRPU

---

## Введение

Подтопление подземными водами городских территорий усложняет проведение земляных работ в ходе строительства. Технологии разработки траншей и котлованов в условиях городской застройки требуют искусственного ограничения контура земляных выемок для защиты от подтопления, обрушения и оплывания. Применение для этого различных креплений в виде шпунтовых свай, стен в грунте и прочих аналогичных конструкций создает участки неоднородности в отношении проницаемости окружающего выработки грунта. Актуальным направлением исследований является совершенствование фильтрационных расчетов при проведении земляных работ в условиях подтопления в городском строительстве с учетом появления техногенных участков неоднородности по проницаемости грунта, окружающего траншеи и котлованы. В представленной работе рассмотрены наиболее распространенные расчетные фильтрационные схемы при выполнении земляных работ в городском строительстве. Произведена исходная постановка соответствующих фильтрационных задач. Поставлены граничные и начальные условия для областей фильтрации подземных вод. Решение задач найдено с применением методов конформных отображений, эквивалентных фильтрационных сопротивлений и интегральных преобразований Лапласа в нестационарной постановке движения подземных вод. Решения снабжены конкретными практическими примерами. Полученная усовершенствованная методика фильтрационных расчетов рекомендуется к применению при выполнении земляных работ в городском строительстве.

## Основная часть

Рассмотрим наиболее распространенные расчетные фильтрационные схемы при проведении земляных работ в городском строительстве, в которых имеются характерные участки искусственных неоднородностей в виде различных креплений – шпунтовых свай, стен в грунте и прочих аналогичных конструкций. Вначале перечислим эти характерные схемы, затем произведем постановку задач и найдем их решения аналитическими методами, комбинируя конформные отображения, эквивалентные фильтрационные сопротивления и интегральные преобразования Лапласа в нестационарной постановке. Это позволит найти достаточно удобные и не очень сложные формулы для расчета реальных процессов фильтрации подземных вод, которые образуют притоки в строительные выработки. Полученные зависимости для расходов и напоров фильтрационных потоков при выполнении земляных работ будут носить оценочный характер, то есть достаточно приближенный. Тем не менее, именно с таких оценок и следует начинать предварительные фильтрационные расчеты при защите от подтопления в городском строительстве. Дальнейшее уточнение режима движения подземных вод в зонах строительных выработок можно произвести с помощью компьютерного моделирования фильтрации воды, однако такие последующие, более точные, шаги в данной работе не рассматриваются.

Три распространенные расчетные фильтрационные схемы при проведении земляных работ в городском строительстве, в которых имеются характерные участки искусственных неоднородностей в виде различных креплений или конструкций изображены на рис. 1–3.

Приведем некоторые пояснения к иллюстрациям. На рис. 1–3 ось симметрии относится к траншее или вытянутому котловану. Непроницаемая стенка *1* обозначает конструкцию в грунте, создающую преграду для движения подземных вод и крепление грунта от обрушения. В случае проницаемой стенки *1*, показанной на рис. 3, считаем, что такая конструкция удерживает от обрушения грунт, но немного пропускает подземную воду. Водоносный пласт *3* может быть напорный или безнапорный. Грунт *4*, как вариант, состоит из водоупорных пород, либо, напротив, он несколько пропускает подземную воду, то есть является проницаемым грунтом в виде относительного водоупора. УПВ – уровень подземных вод.  $L_{\text{вл}}$  – зона влияния земляных работ на естественный уровень подземных вод, который обозначен как «Ест. УПВ». Другие обозначения, изображенные на рисунках, оговорены ниже по ходу изложения.

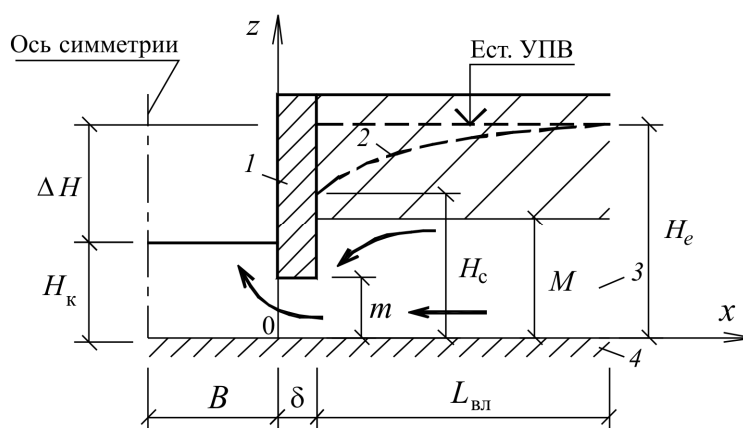


Рис. 1. Расчетная схема 1: *1* – непроницаемая стенка; *2* – пониженный уровень подземных вод; *3* – водоносный пласт; *4* – водоупорный грунт

Fig. 1. Calculation scheme 1: *1* – impermeable wall; *2* – reduced groundwater level; *3* – aquifer; *4* – waterproof soil

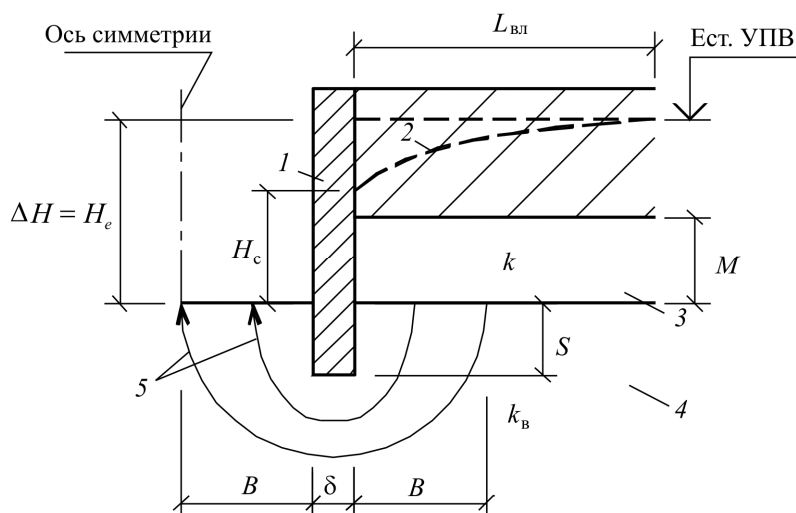


Рис. 2. Расчетная схема 2: 1 – непроницаемая стенка; 2 – пониженный уровень подземных вод; 3 – водоносный пласт; 4 – проницаемый грунт (относительный водоупор); 5 – движение подземных вод в сторону выработки

Fig. 2. Calculation scheme 2: 1 – impermeable wall; 2 – reduced groundwater level; 3 – aquifer; 4 – permeable soil (relative aquiclude); 5 – groundwater movement towards the excavation

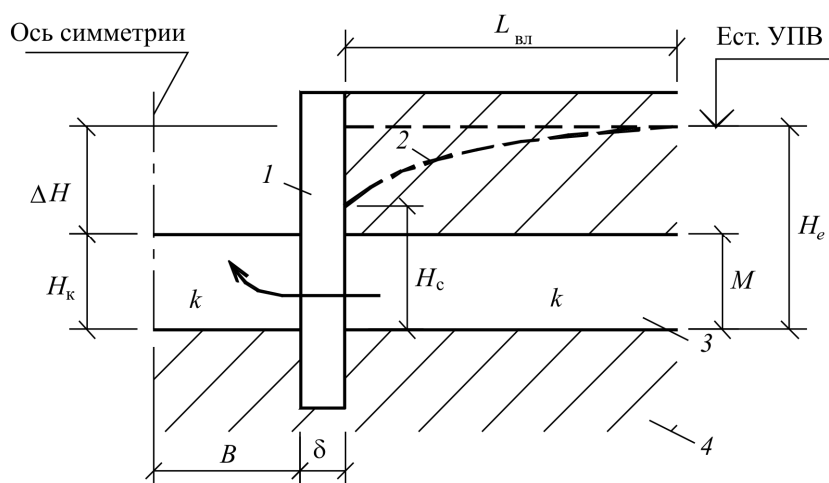


Рис. 3. Расчетная схема 3: 1 – проницаемая стенка; 2 – пониженный уровень подземных вод; 3 – водоносный пласт; 4 – водоупорный грунт

Fig. 3. Calculation scheme 3: 1 – permeable wall; 2 – lowered groundwater level; 3 – aquifer; 4 – waterproof soil

По решению подобных задач вначале сделаем небольшое замечание по обзору имеющихся публикаций за последние годы. Недавно появилась работа исследователей из Китая и Австралии [1] по рассматриваемой тематике в виде аналитических решений, которые дают возможность инженеру выполнить предварительные расчеты напоров и притоков подземных вод в грунтах, окружающих строительные выемки в виде круглых в плане котлованов с участками фильтрационных неоднородностей – ограждающих непроницаемых конструкций. Сравнение результатов нашей работы и упомянутой статьи [1] обсуждено в следующем разделе.

Современная всеобщая тенденция проектирования подобных задач опирается преимущественно на компьютерные технологии в виде численного моделирования фильтрационных потоков в грунте. При этом наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ), а также, как альтернатива, – метод конечных разностей (МКР). Данные методы положены в основу программных комплексов гидрогеологической направленности. МКЭ, например, применен в продукте Seep/W [2–5], а МКР – в известном MODFLOW, с примерами которого можно ознакомиться онлайн в работах [6–9]. Метод же получения аналитических решений, позволяющий найти на основе решения краевых задач приближенные инженерные формулы стал несколько менее популярен среди исследователей. Поэтому представляется актуальным направлением возобновление научного интереса к аналитике, дающей приближенные зависимости, которые позволяют сделать более общие, все охватывающие выводы на их основе в отличие от более точной, но узко направленной технологии численного моделирования геофильтрации.

Приступим к решению поставленных задач. В случае расчетной схемы 1 непроницаемая стенка  $l$  немного не доходит своим низом до нижележащего водоупора (см. рис. 1). Поэтому движение подземных вод по водоносному пласту в сторону строительной выработки является двумерным в вертикальной плоскости. Аналитически такие задачи обычно решают методом конформных отображений, позволяющих учесть двумерную фильтрацию и получить зависимость напоров и расходов подземных вод с учётом горизонтальной и вертикальной координат. Решим эту задачу в два этапа с использованием конформных отображений, фильтрационных сопротивлений и интегральных преобразований Лапласа для учета нестационарной фильтрации подземных вод.

На первом этапе расчетную схему 1 (см. рис. 1) условно заменим на другую схему, не содержащую вертикальных линий фильтрационного тока. На этой, другой схеме, вместо непроницаемой стенки, не доходящей своим нижним концом до водоупорных пород, покажем участок проницаемой неоднородности, перекрывающей полностью движение подземных вод в строительную выработку, но немного пропускающей воду. Материал этой искусственной неоднородности будем считать имеющим коэффициент фильтрации  $k_n$ , который по своему значению несколько меньше коэффициента фильтрации  $k$  водоносного пласта. Толщину этой неоднородности в горизонтальном направлении обозначим  $\delta$ . В результате получим новый рис. 4 взамен рис. 1. Линии тока, подходящие к строительной выработке, стали параллельными горизонтали, то есть движение подземных вод условно от двумерного перешло в одномерное. Решать такие задачи существенно проще.

Коэффициент фильтрации искусственной неоднородности  $k_n$  надо определить такой величины, чтобы фильтрационное сопротивление реальной неоднородности, показанное на рис. 1, было эквивалентно фильтрационному сопротивлению искусственной неоднородности, показанной на рис. 4.

На втором этапе решения задачи составим уравнение баланса фильтрационного потока в строительную выработку, сопоставляя рис. 1 и 4. Вначале запишем значение расхода подземных вод для случая, показанного на рис. 1 в виде

$$q_1 = \frac{\Delta H}{\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3},$$

где  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  – фильтрационные сопротивления трех участков размером соответственно  $B, \delta, L_{вл}$ ;  $\Delta H$  – перепад напоров между  $H_e$  и  $H_k$ , вызывающий движение подземных вод в строительную выработку.

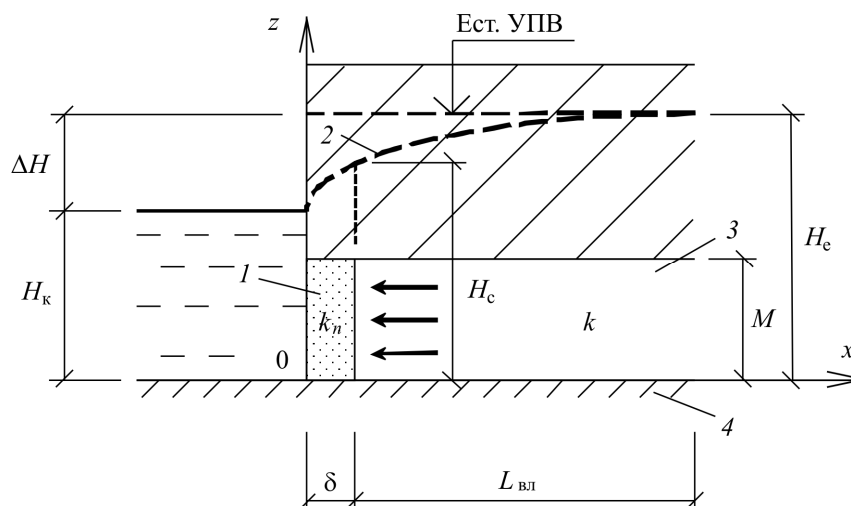


Рис. 4. Искусственная неоднородность с одномерной фильтрацией: 1 – проницаемая стенка толщиной  $\delta$  с коэффициентом фильтрации  $k_n$ ; 2 – пониженный уровень подземных вод; 3 – водоносный пласт; 4 – водоупорный грунт

Fig. 4. Artificial inhomogeneity with one-dimensional filtration: 1 – permeable wall with thickness  $\delta$  with filtration coefficient  $k_n$ ; 2 – lowered groundwater level; 3 – aquifer; 4 – waterproof soil

Значение каждого сопротивления  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ ,  $\zeta_3$  можно определить с применением конформных отображений. Для этого применим методику, приведенную в [10]. Эти сопротивления будут такие:

$$\zeta_1 = \frac{1}{k} \left( \frac{H_c - m}{B} - \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi m}{2B} \right);$$

$$\zeta_1 = \frac{\delta}{m k};$$

$$\zeta_3 = \frac{1}{k} \left( \frac{L_{вл}}{M} - \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi m}{2M} \right).$$

Теперь запишем значение расхода подземных вод для случая, показанного на рис. 4 в виде

$$q_2 = \frac{\Delta H}{\zeta_1 + \zeta_2},$$

где  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  – фильтрационные сопротивления двух участков размером соответственно  $\delta$ ,  $L_{вл}$ ;  $\Delta H$  – перепад напоров.

Значение каждого сопротивления  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  можно также определить с применением конформных отображений. Для этого опять используем рекомендации из [10]. Эти сопротивления выглядят так:

$$\xi_1 = \frac{\delta}{M k_n}; \quad \xi_2 = \frac{L_{вл}}{M k};$$

Задавшись условием равенства фильтрационных расходов по вышеприведенным формулам для  $q_1$  и  $q_4$ , выразим коэффициент фильтрации искусственной неоднородности  $k_n$  для расчетной схемы 1 (см. рис. 1) в виде

$$k_n = \frac{\delta k}{M} \left[ \frac{H_k - m}{B} + \frac{\delta}{m} - \frac{2}{\pi} \ln \left( \sin \frac{\pi m}{2M} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi m}{2B} \right) \right]^{-1}. \quad (1)$$

Для сравнения приведем известную упрощенную формулу для  $k_n$ , которая отражает фильтрационное движение подземных вод лишь параллельно разнородным по проницаемости слоям [11]

$$k_n = \frac{km + 0 \cdot (M - m)}{(M - m) + m} = \frac{km}{M}, \quad (2)$$

однако заметим, что эта формула не учитывает двумерное движение подземных вод в выработки. В этой формуле для частного случая схемы 1 ноль соответствует непроницаемой конструкции.

В реальных условиях в строительных выработках при выполнении земляных работ движение подземных вод происходит в нестационарном режиме. Поэтому расчетные формулы для напоров и расходов получим на основе решения системы исходных дифференциальных уравнений фильтрации в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= \frac{1}{\eta a} \cdot \frac{\partial H_1}{\partial t}; & 0 \leq x \leq \delta; & \quad \eta = \frac{k_n}{k}; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial H_2}{\partial t}; & \delta \leq x \leq \infty; & \quad a = \frac{kM}{\mu}. \end{aligned}$$

Здесь  $t$  – время;  $\mu$  – коэффициент гравитационной или упругой водоотдачи;  $H_1$  – напор внутри искусственной неоднородности;  $H_2$  – напор в прилегающей внешней зоне водоносного пласта. Граничные и начальные условия см. на рис. 4.  $H_e$  – начальное распределение напоров при  $t = 0$ . Граничное условие для координаты  $x$  в виде бесконечности условно, так как в действительности влияние возмущений на уровень подземных вод (УПВ) имеет вполне ограниченное действие [12]. Наиболее интересна в рамках рассматриваемой работы 1-я зона фильтрации с напорами  $H_1$  вблизи контура строительной выработки, где возникают проблемы с повышенными градиентами напоров подземных вод и опасностью обрушения грунта.

Приведенная система уравнений представляет разновидность гидравлической теории фильтрации [13]. Это означает, что вертикальными компонентами скоростей фильтрации можно пренебречь. По меткому замечанию в книге [14], эта предпосылка Дюпюи-Форхгеймера, не взирая на ее приближенность, дает неплохие результаты совпадения теории и практики в гидрогеологических исследованиях. Мощность (толщина)  $M$  относится к напорному водоносному пласту. В случае безнапорного пласта значение  $M$  надо заменить на величину средней мощности водоносного пласта

$$h_c = (H_e + H_k) / 2.$$

Это соответствует 1-му способу линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений безнапорной фильтрации, рекомендованному для прогнозных задач в [13].

Общее решение приведенной выше системы параболических дифференциальных уравнений известно [15]. Научный интерес представляет получение частного решения для мало изученного начального периода времени земляных работ в зонах грунта, примыкающих

к строительным выработкам с фильтрационными неоднородностями. Применяя к системе вышеприведенных уравнений интегрирование по Лапласу, то есть прямое преобразование Лапласа, найдем в частном случае при малых величинах  $t$  (начальный период времени земляных работ) для зоны внутри искусственной неоднородности выражение в изображениях напоров (со знаком надчеркивания) в виде

$$\overline{H}_1 = \frac{H_e}{p} - \frac{H_e - H_k}{p} \cdot (1 - \beta) \cdot \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{p}{\eta a}}\right); \quad \beta = \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}.$$

Здесь  $p$  – промежуточный параметр Лапласа, который нужен для эффективного решения с последующим обратным преобразованием выражения в изображениях напоров.

Применим к последнему выражению в изображениях обратное преобразование Лапласа. В результате, после несложных выкладок, получим формулу для расчета в нестационарном режиме напоров подземных вод в зоне искусственной неоднородности толщиной  $\delta$  (см. рис. 4), которая выглядит так:

$$H_1 = H_e - \Delta H \cdot (1 - \beta) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\eta at}}\right); \quad \beta = \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}; \quad \eta = \frac{k_n}{k}; \quad 0 \leq x \leq \delta. \quad (3)$$

В этой формуле  $\operatorname{erfc}(\dots)$  – математическая функция дополнительного интеграла вероятности, которая является встроенной в большинство распространенных электронных таблиц на персональных компьютерах.

Умножим полученное выражение на величину  $k_n M/B$  (см. обозначения на рис. 1) и проинтегрируем по  $x$ . Тогда получим формулу для расчета нестационарного водопритока подземных вод в строительную выработку с учетом искусственной неоднородности (см. рис. 4) в виде

$$q_n = \frac{k_n M \cdot \Delta H}{B \sqrt{\eta at}}. \quad (4)$$

Рассмотрим теперь расчетную схему 2, показанную на рис. 2. В этом случае непроницаемая стенка 1 полностью перекрывает водоносный пласт и заходит своим низом в относительный водоупорный слой. Движение подземных вод по водоносному пласту в сторону строительной выработки является двумерным в вертикальной плоскости с обтеканием защитной конструкции снизу через относительный водоупор.

Заменим условно схему 2 (см. рис. 2) на схему 4 (см. рис. 4) с целью возможности проведения расчета нестационарной фильтрации подземных вод в траншею или вытянутый котлован. Вначале необходимо найти коэффициент фильтрации  $k_n$  для искусственной неоднородности, показанной на схеме 4, эквивалентный по расходу схеме 2.

Используя опять метод конформных отображений [16], запишем приток в строительную выработку при обтекании фильтрационным потоком непроницаемой стенки через относительный водоупор (см. рис. 2) в виде

$$q_b = \frac{k_b \cdot \Delta H}{B} \cdot \ln \left[ \frac{B}{S} + \sqrt{\left(\frac{B}{S}\right)^2 + 1} \right].$$

Эквивалентный расход через искусственную неоднородность с одномерной фильтрацией (см. рис. 4) будет выглядеть так:



$$q_n = \frac{k_n M \cdot \Delta H}{\delta B}.$$

Приравнивая расходы  $q_b$  и  $q_n$ , после несложных выкладок выразим расчетный коэффициент фильтрации условной искусственной неоднородности для схемы 4 (см. рис. 4), заменяющей расчетную схему 2, в виде

$$k_n = \frac{k_b \delta}{M} \cdot \ln \left[ \frac{B}{S} + \sqrt{\left(\frac{B}{S}\right)^2 + 1} \right]. \quad (5)$$

Дальнейший фильтрационный расчет напоров и расходов при выполнении земляных работ для схемы 2 (см. рис. 2) можно производить по ранее полученным формулам (2) и (3), подставляя в них коэффициент фильтрации условной искусственной неоднородности по формуле (5).

Наконец, рассмотрим расчетную схему 3, показанную на рис. 3. В этом случае стенка  $l$  на краю строительной выработки вовсе не является водонепроницаемой, а лишь удерживает грунт от обрушения. Движение подземных вод по водоносному пласту в сторону строительной выработки является одномерным в вертикальной плоскости с просачиванием через защитную конструкцию стенки. Фильтрационный расчет напоров и расходов при выполнении земляных работ для схемы 3 (см. рис. 3) можно производить по ранее полученным формулам (3) и (4), подставляя в них коэффициент фильтрации проницаемой стенки.

Таким образом, мы рассмотрели три распространенные расчетные схемы фильтрационных водопритоков к строительным выработкам (траншеям и вытянутым котлованам), которые представили на рис. 1–3. Для всех трех случаев получена расчетная методика приближенного определения напоров и расходов подземных вод, просачивающихся к строительным выработкам при наличии в прилегающем грунте участков искусственных неоднородностей в виде ограждающих стенок. Нетрудно заметить, что все три расчетных схемы, показанные на рис. 1–3, сводятся к условной эквивалентной по расходу схеме одномерной фильтрации подземных вод, изображенной на рис. 4. Данные расчеты позволяют найти характеристики фильтрационных потоков в нестационарном режиме движения подземных вод. Это соответствует реальным условиям проведения земляных работ на городских стройках.

Приведем пример сравнительного расчета по разработанной методике фильтрационного прогноза подтопления и дренирования при выполнении земляных работ в городском строительстве. Допустим, что в ходе проектирования на основе данных изысканий выяснилось, что строительная выработка соответствует расчетной схеме 1, показанной на рис. 1.

Пусть будут такие исходные данные. Железобетонная стена в грунте толщиной  $\delta = 0,6$  м перекрывает напорный водоносный пласт мощностью  $M = 11$  м, грунт которого имеет коэффициент фильтрации  $k = 0,1$  м/сут и коэффициент водоотдачи  $\mu = 0,05$ . Стена в грунте не доходит до водоупора на величину  $m = 0,5$  м. Напор водоносного пласта  $H_e = 16$  м. Напор в котловане  $H_k = 6$  м. Разность напоров в пласте и выработке  $\Delta H = 16 - 6 = 10$  м. Половина ширины выработки  $B = 12$  м. Этот случай, например, характерен для строительства котлована станции метрополитена мелкого заложения открытым способом.

Вначале найдем по формуле (1), учитывающей двумерное движение фильтрационных потоков, коэффициент фильтрации искусственной неоднородности  $k_n$ , м/сут:

$$k_n = \frac{\delta k}{M} \cdot \left[ \frac{H_k - m}{B} + \frac{\delta}{m} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left( \sin \frac{\pi m}{2M} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi m}{2B} \right) \right]^{-1} =$$

$$= \frac{0,6 \cdot 0,1}{11} \cdot \left[ \frac{6 - 0,5}{12} + \frac{0,6}{0,5} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left( \sin \frac{\pi \cdot 0,5}{2 \cdot 11} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi \cdot 0,5}{2 \cdot 12} \right) \right]^{-1} = 0,00108.$$

Затем, для методического сравнения, определим по упрощенной формуле (2) этот же коэффициент фильтрации искусственной неоднородности:

$$k_n = \frac{km}{M} = \frac{0,1 \cdot 0,5}{11} = 0,00455,$$

и видим, что формула (2) в 4,2 раза завышает проницаемость искусственной неоднородности на контуре строительной выработки вследствие отсутствия учета в ней двумерного движения подземных вод вблизи котлована или траншеи. Поэтому надежнее использовать формулу (1). Таким образом, принимаем для дальнейшего расчета коэффициент фильтрации искусственной неоднородности со значением

$$k_n = 0,00108.$$

Определим теперь по формуле (3) напор подземных вод с внешней стороны непроницаемой стенки при  $x = \delta$  (см. рис. 1) спустя  $t = 10$  сут от начала выполнения земляных работ с водоотливом:

$$H_c = H_e - \Delta H \cdot (1 - \beta) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\eta at}} \right); \quad \beta = \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}; \quad \eta = \frac{k_n}{k}; \quad x = \delta = 0,6;$$

$$\eta = \frac{0,00108}{0,1} = 0,0108; \quad \beta = \frac{1 - \sqrt{0,0108}}{1 + \sqrt{0,0108}} = 0,8116; \quad a = \frac{kM}{\mu} = \frac{0,1 \cdot 11}{0,05} = 22;$$

$$H_c = 16 - 10 \cdot (1 - 0,8116) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{0,6}{2\sqrt{0,0108 \cdot 22 \cdot 10}} \right) = 14,52.$$

Опять для сравнения рассчитаем по формуле (3) напор подземных вод при  $x = \delta$  в случае отсутствия непроницаемой стенки (см. рис. 1) также как и в предыдущем расчете спустя  $t = 10$  сут от начала выполнения земляных работ с водоотливом. При этом водоносный грунт всюду предполагаем однородным с коэффициентом фильтрации  $k = 0,1$  м/сут. Получим следующее значение напора

$$H_c = 16 - 10 \cdot (1 - 0) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{0,6}{2\sqrt{1 \cdot 22 \cdot 10}} \right) = 6,23.$$

Это сравнение показывает, что недоучет наличия искусственной неоднородности при выполнении земляных работ с водоотливом приводит к слишком оптимистичному прогнозу снижения напора подземных вод вблизи строительных выработок. На самом деле напор снижается гораздо медленнее, что утяжеляет условия проведения строительства. Поэтому для повышения надежности проведения таких строительных работ рекомендуется к использованию при проектировании методика фильтрационных расчётов, предложенная в представленной статье.

## Обсуждение

Наиболее свежей и близкой научной публикацией по затронутой теме является статья авторов из Китая и Австралии [1]. Имеет смысл сделать сравнительное обсуждение данной и нашей работ, раз они близки и перекликаются. Все обоснования, выкладки и расчёты приведены нами в предыдущем разделе. Авторы [1] пишут, что при откачке внутри котлована, огражденном водонепроницаемой завесой, направление движения подземных вод за пределами выемки изменяется с горизонтального на вертикальное за счет наличия завесы-барьера. При этом они утверждают, что не существует аналитического метода расчета распределения напора подземных вод, вызванного осушением внутри котлована. Затем они предлагают простое уравнение, основанное на аналитическом решении, для расчета напоров грунтовых вод внутри и снаружи котлована с водонепроницаемой завесой в напорном водоносном горизонте. Решение в [1] основано на комбинациях применения известной формулы Дюпюи для стационарного режима радиального течения подземных вод. Наше же решение, сравнительно с упомянутой работой [1], получено для более реалистичного неустановившегося режима движения подземных вод в земляную выработку, что обычно более свойственно для технологий городского строительства с конкретными сроками выполнения работ. Тем не менее, и та, и другая методики дополняют друг друга и могут быть рекомендованы к практическому применению при защите от подтопления в городском строительстве.

## Выводы

Таким образом, рассмотрена нестационарная фильтрация подземных вод и поведение их уровня вблизи строительной выработки с характерными участками искусственных неоднородностей в виде различных креплений или конструкций. Исследование показало, что недоучет наличия искусственной неоднородности при выполнении земляных работ с водоотливом приводит к слишком оптимистичному прогнозу снижения напора подземных вод вблизи строительных выработок. На самом деле напор снижается гораздо медленнее, что утяжеляет условия проведения строительных работ. Полученная усовершенствованная методика фильтрационных расчетов рекомендуется к применению при выполнении земляных работ в городском строительстве.

*Финансирование.* Исследование не имело спонсорской поддержки.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Вклад.* 100 %.

## Библиографический список

1. Calculation of groundwater head distribution with a close barrier during excavation dewatering in confined aquifer / Hai-Min Lyu, Shui-Long Shen, Yong-Xia Wu, An-Nan Zhou // Geoscience Frontiers. – March 2021. – Vol. 12, issue 2. – P. 791–803. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.08.002
2. Effect of using grouted vertical barrier on seepage characteristics under small hydraulic structures / M.A. Shousha, A.M. Basha, M.A. El-Enany, H.M. Moghazy // Alexandria Engineering Journal. – February 2020. – Vol. 59, issue 1. – P. 441–455. DOI: 10.1016/j.aej.2020.01.013

3. Reliability analysis of earth dams using direct coupling / A.T. Siacara, G.F. Napa-García, A.T. Beck, M.M. Futai // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – April 2020. – Vol. 12, issue 2. – P. 366–380. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.07.012
4. El-Molla D.A, El-Molla M.A. Reducing the conveyance losses in trapezoidal canals using compacted earth lining // *Ain Shams Engineering Journal*. – September 2021. – Vol. 12, issue 3. – P. 2453–2463. DOI: 10.1016/j.asej.2021.01.018
5. Barkhordari S., Shahdany S.M.H. A systematic approach for estimating water losses in irrigation canals // *Water Science and Engineering*. – June 2022. – Vol. 15, issue 2. – P. 161–169. DOI: 10.1016/j.wse.2022.02.004
6. Mansour M.A., Aly M.M. A simulation-optimization approach for optimal design of dewatering systems in unconfined strata // *Alexandria Engineering Journal*. – April 2020. – Vol. 59, issue 2. – P. 839–850. DOI: 10.1016/j.aej.2020.02.029
7. Niswonger R.G. An Agricultural Water Use Package for MODFLOW and GSFLOW // *Environmental Modelling & Software*. – March 2020. – Vol. 125. – P. 104617. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104617
8. Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool / T. Jafari, A.S. Kiem, S. Javadi, T. Nakamura, K. Nishida // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – June 2021. – Vol. 35. – P. 100822. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100822
9. The MODFLOW Application Programming Interface for simulation control and software interoperability / J.D. Hughes, M.J. Russcher, C.D. Langevin, E.D. Morway, R.R. McDonald // *Environmental Modelling & Software*. – February 2022. – Vol. 148. – P. 105257. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105257
10. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Фильтрационные расчёты гидротехнических сооружений. – М.: Госстройиздат, 1955. – 292 с.
11. Прогнозы подтопления и расчёт дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях: справ. пособие к СНиП / ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Стройиздат, 1991. – 272 с.
12. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
13. Куранов Н.П. Линейные модели гидродинамической теории фильтрации // Доклады АН СССР. – М.: Наука, 1984. – Т. 278, № 2. – С. 309–313.
14. Gorokhovski V.M. Effective Parameters of Hydrogeological Models. – N.Y.: Springer International Publishing, 2014. – 182 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03569-7
15. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. – Oxford: Clarendon Press, 1959. – 491 p.
16. Павловский Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения. – Петроград: Изд-во Научно-мелиорационного института, 1922. – 752 с.

## References

1. Hai-Min Lyu, Shui-Long Shen, Yong-Xia Wu, An-Nan Zhou. Calculation of groundwater head distribution with a close barrier during excavation dewatering in confined aquifer. *Geoscience Frontiers*, 2021, vol. 12, iss. 2, pp. 791–803. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.08.002
2. Shousha M.A., Basha A.M., El-Enany M.A., Moghazy H.M. Effect of using grouted vertical barrier on seepage characteristics under small hydraulic structures. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, vol. 59, iss. 1, pp. 441–455. DOI: 10.1016/j.aej.2020.01.013

3. Siacara A.T., Napa-Garcia G.F., Beck A.T., Futai M.M. Reliability analysis of earth dams using direct coupling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Vol. 12. Issue 2. April 2020. P. 366–380. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.07.012
4. El-Molla D.A., El-Molla M.A. Reducing the conveyance losses in trapezoidal canals using compacted earth lining. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 2453–2463. DOI: 10.1016/j.asej.2021.01.018
5. Barkhordari S., Shahdany S.M.H. A systematic approach for estimating water losses in irrigation canals. *Water Science and Engineering*, 2022, vol. 15, iss. 2, pp. 161–169. DOI: 10.1016/j.wse.2022.02.004
6. Mansour M.A., Aly M.M. A simulation-optimization approach for optimal design of dewatering systems in unconfined strata. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, vol. 59, iss. 2, pp. 839–850. DOI: 10.1016/j.aej.2020.02.029
7. Niswonger R.G. An Agricultural Water Use Package for MODFLOW and GSFLOW. *Environmental Modelling & Software*, 2020, vol. 125, no. 104617. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104617.
8. Jafari T., Kiem A.S., Javadi S., Nakamura T., Nishida K. Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, vol. 35, no. 100822. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100822
9. Hughes J.D., Russcher M.J., Langevin C.D., Morway E.D., McDonald R.R. The MODFLOW Application Programming Interface for simulation control and software interoperability. *Environmental Modelling & Software*, 2022, vol. 148, no. 105257. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105257
10. Aravin V.I., Numerov S.N. Fil'tratsionnyye raschety gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Filtration calculations of hydraulic structures]. Moscow, Gosstroyizdat, 1955, 292 p.
11. Prognozy podtopleniya i raschet drenaznykh sistem na zastraivayemykh i zastroyenykh territoriyakh. Spravochnoye posobiye k SNIIP. VNII VODGEO [Flooding forecasts and calculation of drainage systems in the built-up and built-up areas: Reference Manual to SNIIP. VNII VODGEO]. Moscow, Stroyizdat, 1991, 272 p.
12. Polubarinova-Kochina P.Y. Teoriya dvizheniya gruntovykh vod [Theory of groundwater flow]. Moscow, Nauka, 1977, 664 p.
13. Kuranov N.P. Lineynyye modeli gidrodinamicheskoy teorii fil'tratsii. Doklady AN SSSR [Linear Models of Hydrodynamic Filtration Theory // Reports of the USSR Academy of Sciences.]. Moscow, Nauka, 1984, vol. 278, no. 2, pp. 309–313.
14. Gorokhovskiy V.M. Effective parameters of hydrogeological models. New York, Springer International Publishing, 2014, 182 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03569-7
15. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. Oxford, Clarendon Press, 1959, 491 p.
16. Pavlovskiy N.N. Teoriya dvizheniya gruntovykh vod pod gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami i yeye osnovnyye prilozheniya [Theory of groundwater movement under hydraulic structures and its main applications]. Petrograd, Izd-vo Nauchno-melioratsionnogo instituta, 1922, 752 p.