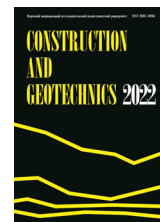




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 2, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.05

УДК 696.1

## РЕШЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОЙ ГЕОТЕХНИКИ В ТОНКИХ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ

**В.И. Сологаев**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 22 ноября 2022

Одобрена: 19 марта 2023

Принята к публикации:

03 июля 2023

#### Ключевые слова:

фильтрационные задачи, строительная геотехника, автомодельные решения, тонкие водоносные пласты.

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены фильтрационные задачи строительной геотехники при движении воды в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов. В таких условиях традиционные подходы, заимствованные из классической гидрогеологии, дают погрешности. Это связано с тем, что в обычных условиях подземных водоносных пластов достаточно большой глубины в гидрогеологической практике используют гидравлическую теорию фильтрации, при которой усредняют скорости фильтрационных течений по вертикальной координате. Исходные нелинейные дифференциальные уравнения фильтрационных потоков подвергают принудительной линеаризации тем или иным известным способом. При этом широко используют способ линеаризации введением средней мощности (глубины) фильтрационного течения. Этот способ изначально разработан для водоносных пластов большой глубины. В представленной работе сделана попытка отказаться от подобной линеаризации и решить часть задач нестационарных фильтрационных течений в тонких водоносных пластах, свойственных строительной геотехнике, с получением аналитических решений конечного вида без введения искусственных упрощений. Предложена методология сочетания аналитических и численных методов в процессе отыскания решений фильтрационных задач строительной геотехники с получением автомодельных зависимостей. Такой подход позволит избежать ошибок линеаризации и проводить фильтрационные расчеты в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов более точно. Обзор отечественных и зарубежных научных публикаций по затронутой теме исследования показал некоторый застой в этом направлении. Сопоставление выявило, что в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов предпочтение можно отдать фильтрационным расчетам по представленной методике, так как она более точно описывает нестационарное движение воды в строительной геотехнике.

© ПНИПУ

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

Valery I. Sologaev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [sologaev\\_vi@cdo.sibadi.org](mailto:sologaev_vi@cdo.sibadi.org), ORCID: 0000-0002-2553-9892



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## SOLUTION OF FILTRATION PROBLEMS OF CONSTRUCTION GEOTECHNOLOGY IN THIN WATER LAYERS

V.I. Sologaeв

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 22 November 2022  
Approved: 19 March 2023  
Accepted for publication:  
03 July 2023

#### Keywords:

filtration problems, construction  
geotechnics, self-similar solutions,  
thin aquifers.

---

### ABSTRACT

Filtration problems of construction geotechnics during water movement in thin permeable layers of soils and artificial materials are considered. Under such conditions, traditional approaches borrowed from classical hydrogeology give errors. This is due to the fact that under normal conditions of underground aquifers of a sufficiently large depth, in hydrogeological practice, the hydraulic theory of filtration is used, in which the velocities of filtration currents are averaged along the vertical coordinate. The original nonlinear differential equations of filtration flows are subjected to forced linearization by one or another known method. In this case, the method of linearization by introducing the average power (depth) of the filtration flow is widely used. This method was originally developed for aquifers of great depth. In the presented work, an attempt was made to abandon such a linearization and solve some of the problems of unsteady filtration flows in thin aquifers, which are characteristic of building geotechnics, with obtaining analytical solutions of the final form without introducing artificial simplifications. A methodology is proposed for combining analytical and numerical methods in the process of finding solutions to filtration problems of construction geotechnics with obtaining self-similar dependencies. This approach will make it possible to avoid linearization errors and carry out filtration calculations in thin permeable layers of soils and artificial materials more accurately. A review of domestic and foreign scientific publications on the topic of research has shown some stagnation in this direction. The comparison revealed that in thin permeable layers of soils and artificial materials, preference can be given to filtration calculations using the presented method, since it more accurately describes the non-stationary movement of water in construction geotechnics.

© PNRPU

---

## Введение

Рассмотрим фильтрационные задачи строительной геотехники при движении воды в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов. Геологические разрезы в условиях городской застройки имеют существенно техногенный характер [1–6]. Центры городов постоянно ремонтируют и перестраивают. В ходе такой строительной деятельности оказываются погребенными слои искусственных материалов, например из асфальта, бетона, щебня, песка. Многие строительные конструкции в грунте имеют слоистое строение с чередованием проницаемых и водоупорных слоев. Типичным примером такой конструкции является городская автомобильная дорога, где есть слои как гидроизоляционные, так и дренирующие. В качестве гидроизоляции обычно выступает асфальтобетон, а в качестве дренирующих слоев традиционно применяют щебень, песок и в последнее время геотекстильный материал в виде сеток и нетканых полотен.

Вода в городских условиях в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов может иметь разное происхождение. Вода может возникать из атмосферы, просачиваясь через трещины и поры в виде инфильтрации или конденсируясь из влажного воздуха. Часть воды в эти тонкие слои попадает из поверхностных источников, водоемов. Кроме того, другой причиной появления фильтрационной влаги в рассматриваемых слоях может быть подток подземных вод. При повышении уровня подземных вод такой процесс называют подтоплением. Вода, появившаяся в рассматриваемых слоях, в редком случае может иметь горизонтальный пьезометрический уровень, при котором ее фильтрационное движение отсутствует. Исключением из этого случая может быть наличие либо вертикального оттока подземной влаги в нижележащий пласт, либо вертикальное испарение воды в атмосферу под влиянием температурных перепадов. Такие случаи в нашей работе не рассматриваются.

Обычно пьезометрические уровни воды в проницаемых слоях находятся на разных высотных отметках. Это создает разность напоров, что приводит в фильтрационное движение воду в слоях. Вода начинает двигаться от большего напора к меньшему. Будем считать, что такие процессы происходят при соблюдении известного закона фильтрации Дарси, принимая ламинарный режим движения воды. Исходная постановка дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную фильтрацию воды в изучаемых слоях, будет соответствовать гидравлической теории фильтрации без линеаризации.

## Основная часть

Фильтрационное движение воды в тонких проницаемых слоях всегда происходит под влиянием разности напоров. Аналитические методы решения таких задач фильтрации наиболее удобно сводить к условно одномерным постановкам. Формулы, которые получают в результате решения этих задач, широко используют в проектно-изыскательском деле. При этом условно одномерные постановки в рамках гидравлической теории фильтрации могут быть рассмотрены для двух основных расчетных случаев.

Первый случай связан с плоскопараллельными задачами, которые применяются для линейных источников подтопления или дренажных систем. Например, разрабатывают траншею, к которой может возникнуть с двух сторон приток подземных вод по техногенным тонким проницаемым слоям. Или, наоборот, произошел внезапный аварийный прорыв воды из инженерной сети в траншею и образовался линейно вытянутый источник подтопления окружающей территории. Требуется рассчитать процесс нестационарной фильтрации воды по техногенным тонким проницаемым слоям с целью дальнейшей разработки защитных мероприятий от подтопления.

Второй случай относится к радиальной в плане фильтрации воды, которая течет по направлению к центру или, наоборот, от центра источника подтопления, вернее, от его границы с пластом к наружным границам области фильтрации. Такой случай типичен в изыскательской практике при определении фильтрационных параметров водоносных пластов с помощью откачек воды из скважин. Однако в рассматриваемой теме фильтрации в техногенных тонких проницаемых слоях более актуально рассмотреть приток воды к небольшим приямам или же, наоборот, решить задачу о подтоплении окружающей территории при постепенной утечке воды из небольшого котлована или выемки с растеканием купола подтопления. Такие две характерные для рассматриваемой темы концептуальные задачи рассмотрим далее по порядку.

Пример для первого случая рассмотрим классический, который ранее был исследован в работе [7]. Однако мы решим его другим, новым, способом. Сравнение позволит нам критически оценить качество новой методики. Исходная постановка фильтрационной задачи о подтоплении первоначально не обводненного тонкого проницаемого слоя грунта или искусственного материала при подпоре воды из линейного источника подтопления показана на рис. 1.

Для этого случая постановка дифференциального уравнения, описывающего нестационарную фильтрацию воды в проницаемом тонком слое, будет соответствовать гидравлической теории фильтрации без линеаризации. Исходное уравнение такого процесса фильтрации можно записать в виде

$$k \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( H \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) = m \cdot \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где левая часть уравнения соответствует изменению расхода воды по закону Дарси, причем мощность (глубина, напор) слоя воды  $H$  стоит под знаком дифференциала, указывая на отсутствие линеаризации. Правая часть уравнения отражает нестационарное изменение насыщения пористой среды водой. Кроме того, обозначены:  $k$  – коэффициент фильтрации грунта или искусственного материала, м/сут;  $m$  – коэффициент недостатка насыщения;  $t$  – время процесса подтопления, сут;  $x$  – горизонтальная координата, м.

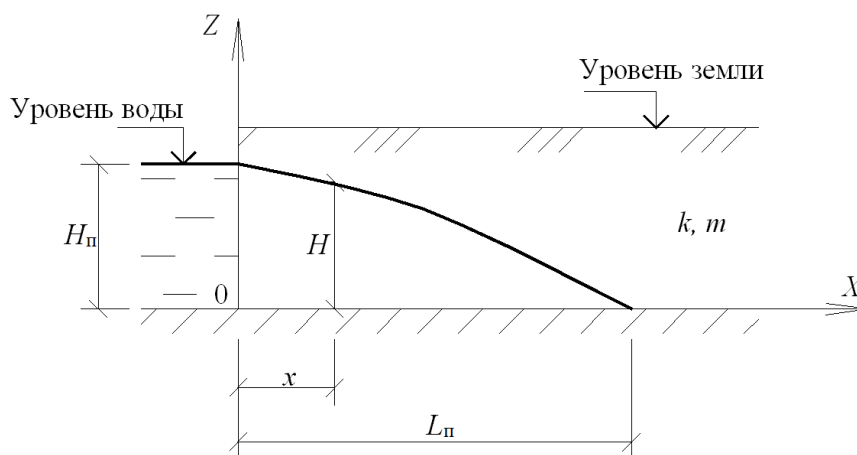


Рис. 1. Зона подтопления  $L_{п}$  из линейно вытянутого источника  
 Fig. 1. Underflooding zone  $L_{п}$  from a linearly elongated source

Краевое условие на левой границе области фильтрации (см. рис. 1):

$$H(0, t) = H_{п}. \quad (2)$$

Краевое условие на правой границе области фильтрации (фронт подтопления):

$$H(L_{п}, t) = 0. \quad (3)$$

Величина зоны подтопления  $L_{п}$  изменяется с течением времени, увеличиваясь в размере (см. рис. 1). Начальное распределение напоров отсутствует, и область фильтрации увеличивается в размере.

Вначале, решая краевую задачу (1) с условиями (2) и (3), будем следовать методологии работы [7]. Дойдя до определенного шага, отметим его и покажем, как дальше можно решить эту задачу по-новому.

Преобразуем размерные переменные  $x$  и  $H$  к двум безразмерным величинам.

Первая переменная отражает безразмерную пространственную координату:

$$S = \frac{x}{\sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot H_{п} \cdot t}{m}}}. \quad (4)$$

Вторая переменная является безразмерным относительным напором:

$$U = \frac{H}{H_{п}}. \quad (5)$$

Тем самым вместо размерных переменных были введены автомодельные безразмерные переменные. Основы данного метода решения с помощью автомодельных безразмерных переменных более подробно изложены в работах [8–12].

Заменим в уравнении (1) размерные переменные на безразмерные. После выкладок приходим к дифференциальному уравнению в следующем виде:

$$\frac{d^2U^2}{dS^2} + 2 \cdot S \cdot \frac{dU}{dS} = 0. \quad (6)$$

Обозначим в (6) первую и вторую производные  $U$  по  $S$  соответственно одним и двумя штрихами и перепишем это уравнение в более компактном виде:

$$U \cdot U'' + (U')^2 + S \cdot U' = 0. \quad (7)$$

Приравнявая в (7)  $U = 0$  и учитывая, что  $U'' \neq \infty$ , получим

$$U' \cdot (U' + S) = 0,$$

откуда при  $U' \neq 0$  вытекает, что

$$U' + S = 0. \quad (8)$$

Теперь переосмыслим задачу от рис. 1 к рис. 2 для лучшего пояснения метода.

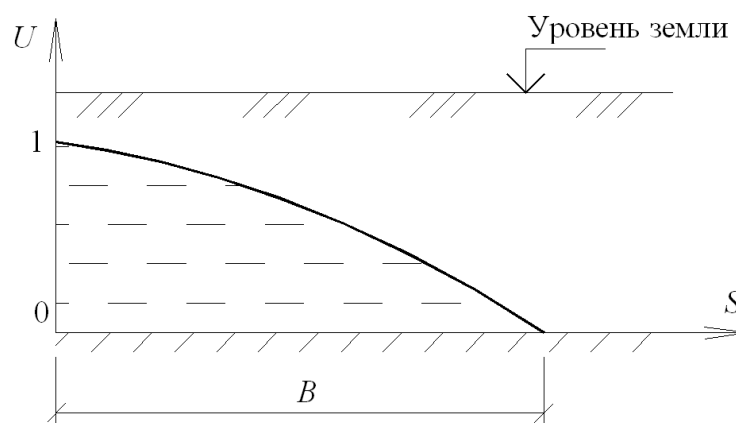


Рис. 2. Линейная зона подтопления в автомодельных переменных  
 Fig. 2. Linear underflood zone in self-similar variables

Длина зоны подтопления из формулы (4) может быть записана как

$$L_n = B \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot H_n \cdot t}{m}}. \quad (9)$$

В работе [7] аналитическим путем найдено, что  $B = 1,143$ .

Поэтому окончательно в [1] была получена длина зоны подтопления в виде

$$L_n = 1,616 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot H_n \cdot t}{m}}. \quad (9a)$$

Начиная с этого момента покажем, как найти другим способом, по-новому, коэффициент  $B$ , отражающий линейную зону подтопления в автомодельных переменных (см. рис. 2). Для этого используем комбинированный аналитико-численный способ с применением метода конечных разностей (МКР).

Запишем уравнение (6) в конечно-разностном виде так:

$$\frac{U_{i-1}^2 - 2 \cdot U_i^2 + U_{i+1}^2}{(\Delta S)^2} + \frac{S_i \cdot (U_{i+1} - U_{i-1})}{\Delta S} = 0. \quad (10)$$

Для МКР-уравнения (10) приводим поясняющий рис. 3.

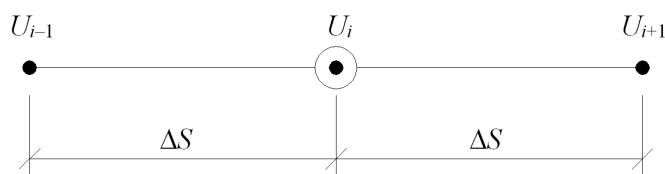


Рис. 3. Конечно-разностная сетка для автомодельных переменных  
 Fig. 3. Finite difference mesh for self-similar variables

Из уравнения (10) выразим значение безразмерного напора в  $i$ -той центральной ячейке МКР-сетки в виде

$$U_i = \sqrt{(U_{i-1}^2 + U_{i+1}^2)/2 + S_i \cdot \Delta S \cdot (U_{i+1} - U_{i-1})/2}. \quad (11)$$

Дальнейшее нахождение искомой величины  $B$  можно выполнить с помощью компьютерной программы на любом языке программирования интерпретирующего или компилирующего типа. Главным требованием к языку программирования является поддержка рекурсии. Запишем алгоритм действий по отысканию  $B$  в виде псевдокода, который можно переписать на любом из упомянутых языков программирования.

Пример псевдокода по нахождению величины  $B$  может быть изложен так:

- пусть первое приближение  $B = 1,000$ ;
- назначаем шаг МКР-сетки  $\Delta S = 0,005$ ;
- принимаем количество шагов МКР-сетки равным 1000;
- дано напор на левой границе области фильтрации  $U = 1$ ;
- дано напор на правой границе области фильтрации  $U = 0$ ;
- записываем напор в узел сетки по формуле (11);
- рассчитываем всю матрицу напоров МКР-модели;
- проверяем, что счет устойчив и процесс расчета сходится;
- если «да», то увеличиваем на один шаг  $\Delta S$  величину  $B$  и рассчитываем матрицу;
- если «нет», то предыдущее  $B$  найдено и записано в файл, расчет закончен.

Программировать вовсе не обязательно по данному псевдокоду. Можно воспользоваться любой электронной таблицей, например Excel, LibreCalc, Gnumeric и т.д. [13]. Подбор величины  $B$  следует производить в табличной МКР-модели, вводя в соседние ячейки таблицы формулу (11). Перед такой подготовкой модели надо в настройках таблицы разрешить выполнение циклических ссылок на соседние ячейки таблицы. Таким путем, вручную, постепенно, можно подобрать величину  $B$ .

В результате получим ответ  $B = 1,143$ .

Это полностью совпадает со значением  $B$ , найденном аналитически в работе [7]. Следовательно, наш новый метод позволяет решать нелинейные задачи фильтрации смешанным аналитико-численным способом. Для исследователей, больше имеющих склонность к программированию, нежели к аналитическим выкладкам, такой метод может быть полезен для получения поисковых результатов. Для исследователей, пока еще неопытных в программировании, можно воспользоваться МКР-моделированием вручную с помощью любого известного редактора электронных таблиц.

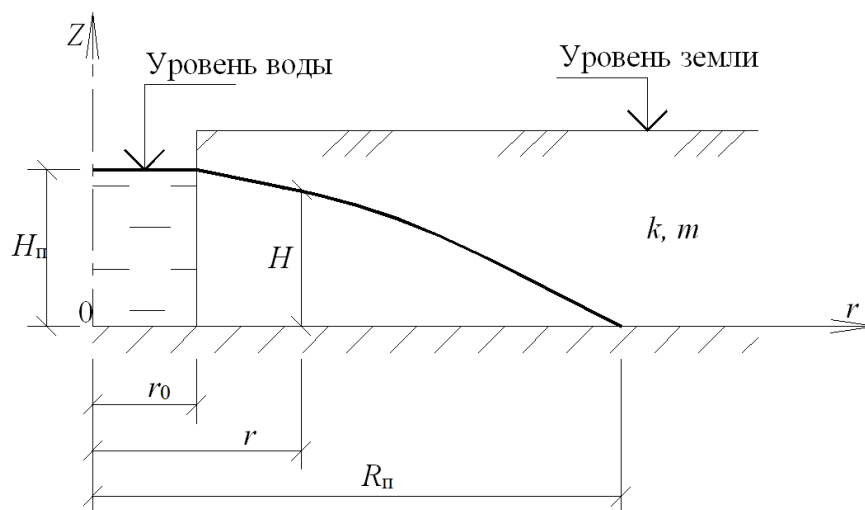


Рис. 4. Радиус подтопления  $R_n$  из компактного источника  
 Fig. 4. Radius of underflooding  $R_n$  from a compact source

Рассмотрим теперь второй случай, относящийся к радиальной в плане фильтрации воды, которая течет по направлению к центру или, наоборот, от центра источника подтопления, вернее, от его границы с пластом к наружным границам области фильтрации. В рассматриваемой теме фильтрации в техногенных тонких проницаемых слоях актуально рассмотреть приток воды к небольшим приямкам или же, наоборот, решить задачу о подтоплении окружающей территории при постепенной утечке воды из небольшого котлована или выемки с растеканием купола подтопления. Далее рассмотрим радиальную задачу о подтоплении окружающей территории от небольшого котлована, приямка или компактного углубления (рис. 4).

Для нахождения решения в радиальных координатах будем применять новый способ, обоснованный в предыдущей задаче плоскопараллельной фильтрации воды. Предположим, требуется найти радиус подтопления  $R_n$  (см. рис. 4) при фильтрации воды из компактного источника, в качестве которого может быть котлован, приямок, компактное углубление, заполненные водой, например, после аварии на какой-либо инженерной системе водоснабжения, водоотведения или теплоснабжения.

Радиус подтопления надо найти в виде

$$R_n = r_0 + B_R \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot H_n \cdot t}{m}}. \quad (12)$$

Здесь  $B_R$  – неизвестный пока коэффициент, который надо подобрать;  $r_0$  – радиус источника подтопления; все остальные обозначения аналогичны предыдущей задаче.

Исходное дифференциальное уравнение, описывающее радиальную нестационарную фильтрацию воды в проницаемом тонком слое, будет соответствовать гидравлической теории фильтрации без линеаризации в следующем виде:

$$\frac{k}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot H \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \right) = m \cdot \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (13)$$

где левая часть уравнения соответствует изменению расхода воды по закону Дарси, причем мощность (глубина, напор) слоя воды  $H$  стоит под знаком дифференциала, указывая на отсутствие линеаризации. Правая часть уравнения отражает нестационарное изменение насыщения пористой среды водой. Вода радиально растекается в плане. Кроме того, обозначены:  $k$  – коэффициент фильтрации грунта или искусственного материала, м/сут;  $m$  – коэффициент недостатка насыщения;  $t$  – время процесса подтопления, сут;  $r$  – радиальная координата, м.

Краевое условие на внутренней границе области фильтрации (см. рис. 4):

$$H(r_0, t) = H_n. \quad (14)$$

Краевое условие на внешней границе области фильтрации (фронт подтопления):

$$H(R_n, t) = 0. \quad (15)$$

Величина радиуса подтопления  $R_n$  изменяется с течением времени, увеличиваясь в размере (см. рис. 4), т.е. сама область фильтрации расширяется, причем за ее пределами, снаружи радиуса подтопления  $R_n$ , воды нет.

Преобразуем размерные переменные  $r$  и  $H$  к двум безразмерным величинам  $n$  и  $U$ .

Первая переменная отражает безразмерную радиальную пространственную координату:

$$n = \frac{r}{\sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot H_n \cdot t}{m}}}. \quad (16)$$

Вторая переменная  $U$  является безразмерным относительным напором по формуле (5). Тем самым вместо размерных переменных были введены автомодельные безразмерные переменные для радиальной задачи.

Подставляя переменные  $n$  и  $U$  в уравнение (13) и переписывая его, соответственно, будем иметь другое уравнение в виде

$$\frac{d^2 U^2}{dn^2} + \frac{1}{n} \cdot \frac{dU^2}{dn} + 2 \cdot n \cdot \frac{dU}{dn} = 0.$$

Последнее уравнение запишем в МКР-представлении в виде

$$\frac{U_{i-1}^2 - 2 \cdot U_i^2 + U_{i+1}^2}{(\Delta n)^2} + \frac{U_{i-1}^2 - U_{i+1}^2}{2 \cdot n_i \cdot \Delta n} + \frac{n_i \cdot (U_{i+1} - U_{i-1})}{\Delta n} = 0. \quad (17)$$

Из уравнения (17) выразим безразмерный напор в  $i$ -й центральной ячейке МКР-сетки для радиальной задачи в виде



$$U_i = \sqrt{\frac{(U_{i-1}^2 + U_{i+1}^2)/2 + n_i \cdot \Delta n \cdot (U_{i+1} - U_{i-1})/2 + \Delta n \cdot (U_{i-1}^2 - U_{i+1}^2)/(4 \cdot n_i)}{4 \cdot n_i}}. \quad (18)$$

Действуя по вышеизложенному алгоритму псевдокода аналогично плоскопараллельной задаче, применяя смешанный аналитико-численный метод, получим в результате формулу для нахождения без линеаризации радиуса подтопления при фильтрации воды из компактного источника, в качестве которого могут быть небольшой котлован, приямок, компактное углубление и т.д., заполненные водой, например, после аварии на какой-либо инженерной системе водоснабжения, водоотведения или теплоснабжения в виде (см. рис. 4):

$$R_{\text{п}} = r_0 \cdot \left[ 1 + (1,51 - 0,046 \cdot \ln \tau) \cdot \sqrt{\tau} \right]; \quad \tau = k \cdot H_{\text{п}} \cdot t / (m \cdot r_0^2). \quad (19)$$

Таким образом, в представленной работе была сделана попытка показать на примерах, как решить часть задач нестационарных фильтрационных течений в тонких водоносных пластах, свойственных строительной геотехнике, с получением аналитических решений конечного вида без введения искусственных упрощений в виде линеаризации исходных дифференциальных уравнений фильтрации. Предложена методология сочетания аналитических и численных методов в процессе отыскания решений фильтрационных задач строительной геотехники с получением автомодельных зависимостей. Такой подход позволит избежать ошибок линеаризации и проводить фильтрационные расчеты в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов более точно.

## Обсуждение

Одной из первых работ, близкой к примерам, представленным в настоящей статье, является публикация [14]. Постановка задачи соответствовала плоскопараллельной фильтрации воды по горизонтальному водоупорному слою (см. рис. 1). Исходное дифференциальное уравнение фильтрации было нелинейным по типу (1). Начальные и граничные условия задачи почти соответствовали (2) и (3), но дополнительно на фронте растекания воды было записано еще одно условие в виде

$$m \cdot \frac{dL_{\text{п}}}{dt} = -k \cdot \frac{dH(L_{\text{п}}, t)}{dx}, \quad (20)$$

где все обозначения такие же, как для (1), (2) и (3), при этом имеется в виду, что  $L_{\text{п}}$  – величина переменная.

По-видимому, условие (20) было избыточным и слишком усложнило задачу, поэтому решение в [14] выписано лишь в общем виде, но не доведено до расчетной формулы для величины  $L_{\text{п}}$  (см. рис. 1).

Окончательное решение в замкнутом виде для плоскопараллельной фильтрации воды было получено в статье [7]. Это решение (9). В практике гидрогеологии оно считается классическим. В дальнейшем оно было опубликовано в монографии [15].

Наше решение по радиальной фильтрации получено в виде формулы (19) для радиуса подтопления при растекании воды в грунте или искусственном материале из компактного источника, в качестве которого могут быть небольшой котлован, приямок, компактное углубление и т.д., заполненные водой, например, после аварии на какой-либо инженерной системе водоснабжения, водоотведения, теплоснабжения. Это решение прошло независи-

мую проверку в лабораторных условиях и показало достаточную надежность с погрешностями результатов не более 5 %.

Обзор иностранных публикаций по рассматриваемой тематике показал некоторый застой в этом направлении. Тем не менее следует отметить интересную работу [16], где сделан достаточно категоричный вывод о неопределенности проверок теоретических методов и методик по определению эффективных параметров гидрогеологических моделей в условиях природных пластов. Переосмысляя данную работу применительно к нашему исследованию, следует отметить гораздо большую эффективность при проверке полученных расчетных формул теории фильтрации именно лабораторных условий, нежели природных. Это можно объяснить гарантированной определенностью тщательной подборки фильтрационных параметров лабораторных моделей. Подобный подход ранее встречался в работе [17].

## **Выводы**

Таким образом, рассмотрены некоторые фильтрационные задачи строительной геотехники при движении воды в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов. В таких условиях традиционные подходы, заимствованные из классической гидрогеологии, дают погрешности. Это связано с тем, что в обычных условиях подземных водоносных пластов достаточно большой глубины в гидрогеологической практике используют гидравлическую теорию фильтрации, при которой усредняют скорости фильтрационных течений по вертикальной координате. Исходные нелинейные дифференциальные уравнения фильтрационных потоков подвергают принудительной линеаризации тем или иным известным способом. При этом широко используют способ линеаризации введением средней мощности (глубины) фильтрационного течения. Этот способ изначально разработан для водоносных пластов большой глубины. В представленной работе сделана попытка отказаться от подобной линеаризации и решить часть задач нестационарных фильтрационных течений в тонких водоносных пластах, свойственных строительной геотехнике, с получением аналитических решений конечного вида без введения искусственных упрощений. Предложена методология сочетания аналитических и численных методов в процессе отыскания решений фильтрационных задач строительной геотехники с получением автоматических зависимостей. Такой подход позволит избежать ошибок линеаризации и проводить фильтрационные расчеты в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов более точно. Обзор отечественных и зарубежных научных публикаций по затронутой теме исследования показал некоторый застой в этом направлении. Сопоставление выявило, что в тонких проницаемых слоях грунтов и искусственных материалов предпочтение можно отдать фильтрационным расчетам по представленной методике, так как она более точно описывает нестационарное движение воды в строительной геотехнике.

***Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.*

***Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

***Вклад автора.** 100 %.*

## **Библиографический список**

1. Huggenberger P., Jannis E. Urban geology. Process-oriented concepts for adaptive and integrated resource management. – Springer, Basel, 2011. – 233 p. DOI: 10.1007/978-3-0348-0185-0

2. Gattinoni P., Pizzarotti E., Scesi L. *Engineering Geology for Underground Works*. – Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2014. – 312 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7850-4
3. Kringel R. Mass balance of nitrogen and potassium in urban groundwater in Central Africa // *Science of the Total Environment*. – 2016. – № 547. – P. 382–395. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.090
4. Briaud J.L. *Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils*. – Wiley, 2013. – 1024 p. DOI: 10.1002/9781118686195
5. Cushman J.H., Tartakovsky D.M. *The Handbook of groundwater engineering*. – CRC Press, 2016. – 1074 p. DOI: 10.1201/9781315371801
6. Сологаев В.И. Совершенствование фильтрационных расчетов в условиях подтопления строительных выработок с ограждениями // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 3. – С. 50–62. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.05
7. Полубаринова-Кочина П.Я. О перемещении языка грунтовых вод при фильтрации из канала // *Доклады АН СССР*. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – Т. 82, № 6. – С. 853–855.
8. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. *Движение жидкостей и газов в природных пластах*. – М.: Недра, 1984. – 211 с.
9. Калиткин Н.Н. *Численные методы*. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
10. Карташов Э.М. *Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел*. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.
11. Самарский А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование*. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
12. Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
13. Foulkes L. *Learn Microsoft Office 2019. A comprehensive guide to getting started with Word, PowerPoint, Excel, Access, and Outlook*. – Birmingham: Packt Publishing, 2020. – 776 p.
14. Веригин Н.Н. О фильтрации из канала в сухой грунт // *Доклады АН СССР*. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – Т. 79, № 4. – С. 581–584.
15. Полубаринова-Кочина П.Я. *Теория движения грунтовых вод*. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
16. Gorokhovski V.M. *Effective Parameters of Hydrogeological Models*. – New York: Springer International Publishing, 2014. – 182 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03569-7
17. Аверьянов С.Ф. *Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод // Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод*. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – С. 85–447.

## References

1. Huggenberger P., Jannis E. *Urban geology. Process-oriented concepts for adaptive and integrated resource management*. Springer, Basel, 2011, 233 p. DOI: 10.1007/978-3-0348-0185-0.
2. Gattinoni P., Pizzarotti E., Scesi L. *Engineering Geology for Underground Works*. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2014. 312 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7850-4.
3. Kringel R. Mass balance of nitrogen and potassium in urban groundwater in Central Africa. *Science of the Total Environment*, 2016, no. 547, pp. 382–395. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.090.
4. Briaud J.L. *Geotechnical engineering: Unsaturated and saturated soils*. Wiley, 2013, 1024 p. DOI: 10.1002/9781118686195.

5. Cushman J.H., Tartakovsky D.M. The Handbook of groundwater engineering. CRC Press, 2016, 1074 p. DOI: 10.1201/9781315371801.
6. SologaeV V.I. Improvement of filtration calculations in conditions of underflooding of building workings with fences. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 50-62. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.05.
7. Polubarinova-Kochina P.Y. O peremeshchenii yazyka gruntovykh vod pri fil'tratsii iz kanala [About the movement of the groundwater tongue during filtration from the canal]. *Doklady AN SSSR*. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1952, vol. 82, no. 6, pp. 853-855.
8. Barenblatt G.I., Yentov V.M., Ryzhik V.M. Dvizheniye zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh [The movement of fluids and gases in natural reservoirs]. Moscow, Nedra, 1984, 211 p.
9. Kalitkin N.N. Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow, Nauka, 1978. – 512 p.
10. Kartashov E.M. Analiticheskiye metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel [Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 480 p.
11. Samarskiy A.A., Mikhaylov A.P. Matematicheskoye modelirovaniye [Mathematical modeling]. Moscow, Fizmatlit, 2001, 320 p.
12. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike [Similarity and Dimension Methods in Mechanics]. Moscow, Nauka, 1981, 448 p.
13. Foulkes L. Learn Microsoft Office 2019. A comprehensive guide to getting started with Word, PowerPoint, Excel, Access, and Outlook. Birmingham, Packt Publishing, 2020, 776 p.
14. Verigin N.N. O fil'tratsii iz kanala v sukhoy grunt [About the filtration from the channel into the dry ground]. *Doklady AN SSSR*. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1951, vol. 79, no. 4, pp. 581-584.
15. Polubarinova-Kochina P.Y. Teoriya dvizheniya gruntovykh vod [Theory of groundwater movement]. Moscow, Nauka, 1977, 664 p.
16. Gorokhovskiy V.M. Effective parameters of hydrogeological models. New York, Springer International Publishing, 2014, 182 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03569-7.
17. Aver'yanov S.F. Fil'tratsiya iz kanalov i yeye vliyaniye na rezhim gruntovykh vod [Filtration from canals and its impact on groundwater regime]. *Vliyaniye orositel'nykh sistem na rezhim gruntovykh vod*. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1956, pp. 85-447.