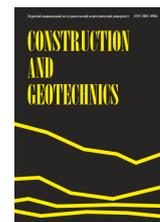




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 2, 2024

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.01

УДК 696.1

## ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЁТЫ ТЕХНОГЕННОЙ ВЕРХОВОДКИ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**В.И. Сологаев**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),  
Омск, Российская Федерация

### О СТАТЬЕ

Получена: 26 января 2024  
Одобрена: 17 апреля 2024  
Принята к публикации:  
03 июня 2024

#### Ключевые слова:

фильтрационные задачи,  
техногенная верховодка,  
строительная геотехника.

### АННОТАЦИЯ

В ходе строительного освоения городских территорий массивы грунтов оснований претерпевают техногенные изменения. Снос существующих зданий и сооружений в ходе перепланировки застройки сопровождается появлением погребенных конструкций и других искусственных включений в геологическом разрезе. Такие техногенные неоднородности искажают естественную картину движения подземных вод. Фильтрационные потоки, сформировавшиеся до начала реконструкции городской застройки, начинают менять своё направление, расходы и напоры. Местами происходит дренирование, но чаще возникает подтопление городской территории вследствие нарушения сложившегося режима подземных вод. Проектировщику городского строительства необходимо заранее предвидеть и рассчитать подобные изменения в поведении подземной гидросферы. Одним из направлений такого прогнозирования являются фильтрационные расчёты техногенной верховодки, которая может образоваться и привести к подтоплению застройки. Этому вопросу посвящена представленная работа. Проанализировано образование техногенной верховодки при наличии дополнительной инфильтрации влаги на поверхность искусственных неоднородностей с пониженной проницаемостью. Произведён обзор имеющихся решений предшествующих исследователей в нашей стране и за рубежом. Предложены две расчётные схемы образования верховодки на слабопроницаемых линзах. Дополнительно обосновано граничное условие стока подземной влаги с искусственных включений. Оговорено дальнейшее возможное развитие темы исследования, даны направления развития класса подобных фильтрационных задач. Предпринятые аналитические исследования проверены численным моделированием с оценкой погрешностей расчётов. Полученные инженерные формулы рекомендованы для фильтрационных расчётов техногенной верховодки в условиях реконструируемой городской застройки.

© 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)

## **FILTRATION CALCULATIONS OF TECHNOGENIC TOP GROUNDWATER IN URBAN CONSTRUCTION**

**V.I. SologaeV**

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 26 January 2024  
Approved: 17 April 2024  
Accepted for publication:  
03 June 2024

---

#### Keywords:

filtration problems, technogenic  
perched aquifer, construction geo-  
technics

---

### ABSTRACT

In the course of the construction development of urban areas, foundation soil arrays undergo technogenic changes. The demolition of existing buildings and structures during the redevelopment of development is accompanied by the appearance of buried structures and other artificial inclusions in the geological section. Such technogenic heterogeneities distort the natural pattern of groundwater movement. Filtration flows, formed before the reconstruction of urban development, begin to change their direction, costs and pressures. Drainage occurs in some places, but more often - flooding of the urban area due to violation of the established groundwater regime. The urban designer needs to anticipate and calculate such changes in the behavior of the underground hydrosphere in advance. One of the directions of such forecasting is filtration calculations of technogenic top groundwater, which can form and lead to flooding of buildings. This work is devoted to this issue. The formation of technogenic top groundwater is analyzed in the presence of additional moisture infiltration onto the surface of artificial inhomogeneities with reduced permeability. A review of the available solutions of previous researchers in our country and abroad is made. Two computational schemes for the formation of perched water on low-permeable lenses. In addition, the boundary condition for underground moisture runoff from artificial inclusions is substantiated. Further possible development of the research topic is discussed, directions for the development of a class of similar filtration problems are given. The obtained analytical studies are verified by numerical simulation with estimation of calculation errors. Engineering formulas are recommended for filtration calculations of technogenic top groundwater in the conditions of reconstructed urban development.

---

## **Введение**

В ходе строительного освоения городских территорий массивы грунтов оснований претерпевают техногенные изменения [1–8]. Снос существующих зданий и сооружений в ходе перепланировки застройки сопровождается появлением погребенных конструкций и других искусственных включений в геологическом разрезе. Такие техногенные неоднородности искажают естественную картину движения подземных вод. Фильтрационные потоки, сформировавшиеся до начала реконструкции городской застройки, начинают менять своё направление, расходы и напоры. Местами происходит дренирование, но чаще возникает подтопление городской территории вследствие нарушения сложившегося режима подземных вод. Проектировщику городского строительства необходимо заранее предвидеть и рассчитать подобные изменения в поведении подземной гидросферы. Одним из направлений такого прогнозирования являются фильтрационные расчёты техногенной верховодки, которая может образоваться и привести к подтоплению застройки. Этому вопросу посвящена представленная работа.

## **Основная часть**

Покажем вначале на реальном примере, каким образом в условиях города может появляться и развиваться во времени техногенная верховодка из подземной влаги. Для этого рассмотрим, как происходило освоение прибрежной территории города Омска на реке Ир-

тыше с применением технологии строительного гидронамыва. Данную технологию начали применять в Омске с начала 1960-х гг. До этого времени берега Иртыша в пределах черты города были низкие, глинистые, часто подвергались наводнениям. Тем не менее они имели одноэтажную застройку с приусадебными участками, имелись дороги. Перед началом освоения этих территорий под набережные – с помощью гидронамыва песчаной пульпой из русла Иртыша – упомянутая застройка была снесена. При этом остались погребенные дороги в виде участков техногенной неоднородности с пониженной проницаемостью. Кроме того, где-то имелись заасфальтированные или забетонированные площадки, которые также являются своеобразными зонами техногенных включений. После гидронамыва на прибрежной территории образовался искусственный слой песчаного грунта. Песок, по нашим замерам мелкий, имел коэффициент фильтрации около 5 м/сут.

Величина проницаемости у песка гидронамыва существенно больше, чем у глинистых грунтов берегов Иртыша. Поэтому данный песок является техногенным водоносным грунтом, а естественные грунты, менее проницаемые, начинают играть роль относительного водоупора. Кроме того, дополнительные техногенные включения типа строительных конструкций дорог и фундаментов зданий имеют ещё менее проницаемые свойства. Перечисленные изменения грунтов прибрежной зоны города способствуют образованию техногенной верховодки.

В дальнейшем прибрежные намывные территории Омска были застроены. Строительство продолжается до сих пор по причине привлекательности площадок у реки. Слой техногенного песка гидронамыва варьируется в пределах 1–5 м. Площадки гидронамыва под застройку занимают прибрежные полосы шириной 1–2 км от уреза воды Иртыша. Бурение скважин изыскательскими организациями Омска на этих территориях показало местами образование участков подтопления в виде верховодки. Поэтому имеет смысл разработать методологию прогноза подтопления за счёт верховодки на слабопроницаемых локальных включениях в грунте, которые назовём линзами. Покажем аналитический метод решения подобных задач для двух схематизированных случаев в виде плоскопараллельной и радиальной фильтрации подземных вод.

Первый случай образования верховодки относится к плоскопараллельной стационарной фильтрации. Рассмотрим вытянутую в плане слабопроницаемую линзу грунта или строительного материала на некоторой глубине от дневной поверхности, т.е. от уровня земли (Ур.з.), что схематично показано на рис. 1. Сверху поступает техногенное инфильтрационное питание влаги интенсивностью  $w$ , м/сут. Слабопроницаемая линза частично пропускает воду вниз и частично – горизонтально к краю линзы, где происходит боковой сток, показанный стрелкой около точек  $A$  и  $B$ . В результате равенства притока и оттока влаги образуется установившийся уровень верховодки. Между уровнем верховодки и поверхностью линзы показан фильтрационный поток влаги с линиями равных напоров. Под линзой движение влаги вновь становится инфильтрационным с неполным насыщением грунта.

Верховодка образуется на слабопроницаемой линзе при выполнении следующего неравенства:

$$k_0 < w < k, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации грунта, м/сут;  $w$  – интенсивность техногенного инфильтрационного питания влаги, м/сут;  $k_0$  – коэффициент фильтрации линзы, м/сут.

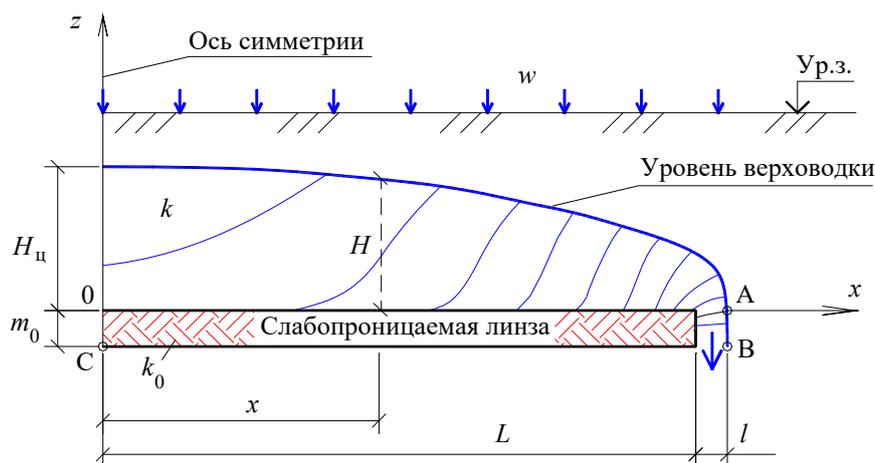


Рис. 1. Верховодка на вытянутой линзе  
 Fig. 1. Perched aquifer on the elongated aquiclude

Составим с помощью дифференциалов баланс влаги при образовании верховодки на линзе для варианта, показанного на рис. 1. Тогда получим

$$kH \frac{dH}{dx} - \frac{k_0}{m_0} H dx + w dx = 0, \quad (2)$$

где  $H$  – фильтрационный напор верховодки; остальные обозначения см. к формуле (1), а также на рис. 1.

Дифференцируя выражение (2) по координате  $x$ , найдём дифференциальное уравнение рассматриваемого фильтрационного течения в виде

$$\frac{d}{dx} \left( H \frac{dH}{dx} \right) - \frac{k_0}{k m_0} H + \frac{w}{k} = 0. \quad (3)$$

Следуя Н.Н. Веригину [9], введём вспомогательную подстановку для решения уравнения (3)

$$U = H^2. \quad (4)$$

В таком случае уравнение (3) преобразуется к следующему виду

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{2k_0}{k m_0 h_c} \left( \frac{w m_0 h_c}{k_0} - U \right) = 0, \quad (5)$$

где  $h_c$  – средняя толщина (мощность) техногенной верховодки.

Применим для удобства дополнительные обозначения:

$$\lambda^2 = \frac{2k_0}{k m_0 h_c}; \quad (6)$$

$$y = \frac{w m_0 h_c}{k_0} - U, \quad (7)$$

при этом уравнение (5) можно записать так:

$$\frac{d^2y}{dx^2} - \lambda^2 y = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) известно в математическом анализе [10] и выглядит как

$$y = C_1 \operatorname{ch}(\lambda x) + C_2 \operatorname{sh}(\lambda x). \quad (9)$$

Отсюда, учитывая (7), найдём общее решение поставленной задачи в виде

$$U = \frac{wm_0 h_c}{k_0} - C_1 \operatorname{ch}(\lambda x) + C_2 \operatorname{sh}(\lambda x). \quad (10)$$

Здесь  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

В случае фильтрационного движения воды, показанном на рис. 1, граничные условия можно определить следующим образом.

В центре линзы ( $x = 0$ ) оттока воды в горизонтальном направлении нет, поэтому тут запишем граничное условие 2-го рода (по Нейману)

$$\frac{dH(0)}{dx} = 0; \quad \frac{dU(0)}{dx} = 0. \quad (11)$$

Сбоку линзы, где верховодка стекает вниз, в точке  $A$  при  $x = L + l$  (см. рис. 1), определим граничное условие 1-го рода (по Дирихле)

$$H = 0; \quad U = 0. \quad (12)$$

Дифференцирование общего решения (10) по  $x$  приводит к выражению

$$\frac{dU}{dx} = -\lambda C_1 \operatorname{sh}(\lambda x) - \lambda C_2 \operatorname{ch}(\lambda x). \quad (13)$$

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  находим из граничных условий (11) и (12). Подставляем их в общее решение (10). Используя подстановку (4), после несложных математических выкладок получаем искомое решение для верховодки на вытянутой линзе в диапазоне горизонтальных координат  $0 \leq x \leq L + l$  для уровней воды (напоров) в виде (см. рис. 1)

$$H(x) = \sqrt{\frac{wm_0 h_c}{k_0} \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ch}(\lambda x)}{\operatorname{ch}[\lambda(L+l)]} \right\}}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{2k_0}{km_0 h_c}}. \quad (14)$$

В центре линзы (при  $x = 0$ ) будет наблюдаться максимальный уровень (напор) верховодки (см. рис. 1)

$$H_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{wm_0 h_c}{k_0} \left\{ 1 - \frac{1}{\operatorname{ch}[\lambda(L+l)]} \right\}}. \quad (15)$$

Среднюю толщину (мощность) техногенной верховодки поперёк вытянутой линзы можно найти численно с помощью простого определённого интеграла в виде

$$h_c = \frac{1}{L+l} \int_0^{L+l} H dx. \quad (16)$$

При этом выражение (14) надо подставлять в (16) вместо  $H$  и рассчитывать величину  $h_c$  рекурсивно, последовательными приближениями. Такую операцию легко произвести в любом известном математическом пакете. Например, с помощью MathCAD [11], Mathematica [12], Maxima [13] и т.д.

Второй случай образования верховодки относится к радиальной стационарной фильтрации. Рассмотрим круглую в плане слабопроницаемую линзу грунта или строительного материала на некоторой глубине от дневной поверхности, т.е. от уровня земли (Ур.з.), что схематично показано на рис. 2. Сверху поступает техногенное инфильтрационное питание влаги интенсивностью  $w$ , м/сут. Слабопроницаемая линза частично пропускает воду вниз и частично – горизонтально к краю линзы, где происходит боковой сток, показанный стрелкой вниз. В результате равенства притока и оттока влаги образуется установившийся уровень верховодки. Между уровнем верховодки и поверхностью линзы показан фильтрационный поток влаги с линиями равных напоров. Под линзой движение влаги вновь становится инфильтрационным с неполным насыщением грунта.

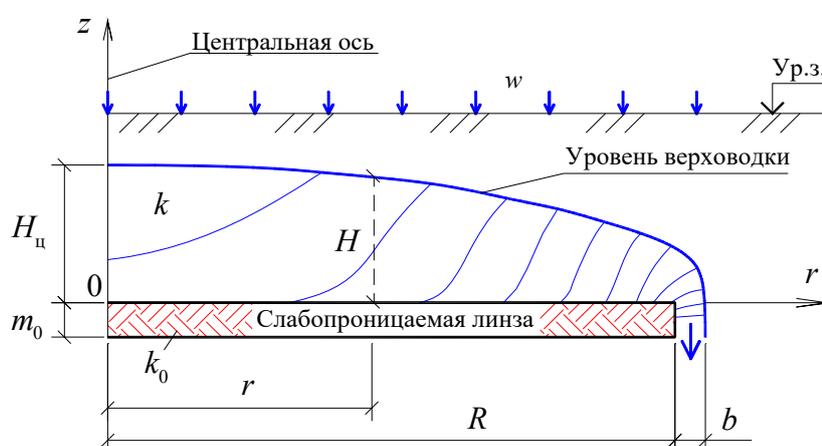


Рис. 2. Верховодка на круглой линзе  
 Fig. 2. Perched aquifer on a round aquiclude

Верховодка образуется на слабопроницаемой круглой линзе при выполнении неравенства (1). Решение для уровней воды  $H$  (напоров) верховодки ищем аналогично предыдущим выкладкам, переосмысливая задачу для осевой симметрии движения фильтрационных потоков техногенной инфильтрационной влаги в грунте. Начальное уравнение течения в дифференциальном виде выглядит так:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( H \frac{dH}{dr} \right) - \frac{k_0}{km_0} H + \frac{w}{k} = 0. \quad (17)$$

Граничные условия для этого случая (см. рис. 2) имеют следующий вид:  
 в центре ( $r = 0$ )

$$\frac{dH}{dr} = 0; \quad (18)$$

на краях ( $r = R + b$ )

$$H = 0. \quad (19)$$

Решая уравнение (17) при граничных условиях (18) и (19), находим формулу для расчёта уровней воды  $H$  (напоров) верховодки на слабопроницаемой круглой линзе:

$$H(r) = \sqrt{\frac{wm_0h_c}{k_0}} \left\{ 1 - \frac{I_0(\lambda r)}{I_0[\lambda(R+b)]} \right\}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{2k_0}{km_0h_c}}. \quad (20)$$

Здесь  $I_0$  – функция Бесселя. Обозначения см. на рис. 2.

Уровень воды (напор) верховодки в центре круглой линзы ( $r = 0$ ) будет

$$H_u = \sqrt{\frac{wm_0h_c}{k_0}} \left\{ 1 - \frac{1}{I_0[\lambda(R+b)]} \right\}. \quad (21)$$

Среднюю толщину (мощность) техногенной верховодки для круглой линзы можно найти численно с помощью простого определённого интеграла в виде

$$h_c = \frac{2}{(R+b)^2} \int_0^{R+b} r H dx, \quad (22)$$

причём выражение (20) надо подставлять в (22) вместо  $H$  и рассчитывать величину  $h_c$  рекурсивно, последовательными приближениями. Такую операцию легко произвести в любом известном математическом пакете. Например, с помощью MathCAD [11], Mathematica [12], Maxima [13] и т.д.

Получив основные формулы (14)–(16), (20)–(22) для расчёта техногенной верховодки на вытянутых и круглых линзах, далее в обсуждении проверим их моделированием, а также рассмотрим методологии решения подобных задач у других исследователей.

## Обсуждение

Проверим выборочно полученные зависимости (14)–(16), (20)–(22) для техногенной верховодки на вытянутых и круглых линзах с помощью моделирования фильтрации методом конечных разностей (МКР), методология которого подробно представлена, например, в книге [14].

Для контрольного примера возьмём фильтрационные параметры и геометрические размеры, встреченные в ходе гидрогеологических изысканий в Омске. Пусть интенсивность техногенного инфильтрационного питания влаги  $w = 0,01$  м/сут. Коэффициент фильтрации грунта  $k = 0,1$  м/сут. Коэффициент фильтрации техногенной геологической линзы  $k_0$  является величиной переменной для разных участков территории застройки. Полуширина вытянутой линзы  $L$  и радиус круглой линзы  $R$  приняты равными для удобства сравнения расчётов и моделирования  $L = R = 10$  м. Расчётные схемы для первого и второго случая, соответственно, представлены на рис. 1 и 2.

Компьютерные модели верховодок построены методом конечных разностей. Решены профильные задачи фильтрации подземной влаги верховодки в виде двумерных стационарных МКР-сеток. Пример МКР-модели представлен на рис. 3.

Результаты моделирования двумерных задач двух типов верховодок, в частности, отражены на рис. 1 и 2, где показаны точные значения линий равных напоров между уровнем верховодки и поверхностью слабопроницаемой линзы. Замечено, что в центральных час-

тах верховодки векторы скоростей фильтрации изменяют направление от вертикального вниз к наклонному положению к линии горизонта на удалении от центральной оси  $z$ . Ближе к краям фильтрационное течение стремится перейти к горизонтальному направлению.

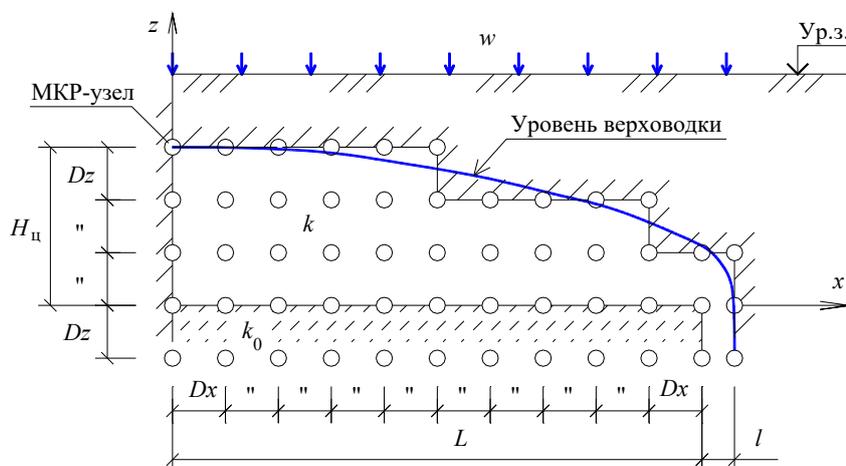


Рис. 3. Пример модели верховодки на вытянутой линзе  
 Fig. 3. Example of a perched aquifer model on the elongated aquiclude

В таблице представлено сравнение аналитических расчётов по формулам и результатов двумерного моделирования методом конечных разностей, соответственно для техногенных верховодок на вытянутых линзах.

Сравнение формул и модели верховодки на вытянутой линзе

Comparison of formulas and models of perched aquifer on the elongated aquiclude

$k_0$ , м/сут	Расчёт по формулам (15) и (16)		Результаты МКР-модели	
	$H_{ц}$ , м	$h_{с}$ , м	$H_{ц}$ , м	$h_{с}$ , м
0,0001	3,37	2,65	3,39	2,64
0,001	2,38	1,91	2,49	2,05
0,005	0,877	0,778	0,963	0,819
0,009	0,517	0,481	0,554	0,498

Аналогичное сравнение было произведено для верховодки на круглой линзе.

Проверка на МКР-моделях показала, что полученные зависимости (14)–(16), (20)–(22) имеют несущественные погрешности в пределах нескольких процентов, поэтому данные формулы можно рекомендовать для прогноза подтопления верховодкой застраиваемых территорий при выполнении геотехнических обоснований.

Приведём теперь сравнение с работами других авторов в данном направлении.

География исследований проблем техногенной верховодки на территориях застройки довольно широка, обзор публикаций охватывает многие страны мира, в частности, Россию [15–17], Эфиопию [18], Францию [19], Израиль [20], Индонезию [21], Италию [22], Испанию [23] и т.д.

Например, в статье испанских исследователей [23] рассмотрена проблема подтопления верховодкой территории города Сарагосы. Обращено внимание на комплексное воздействие нежелательного обводнения грунтов, повышенного содержания солей в подземной влаге и химических реакций в грунте. Рис. 4 и 5 дают достаточное представление о важности рассматриваемых материалов.

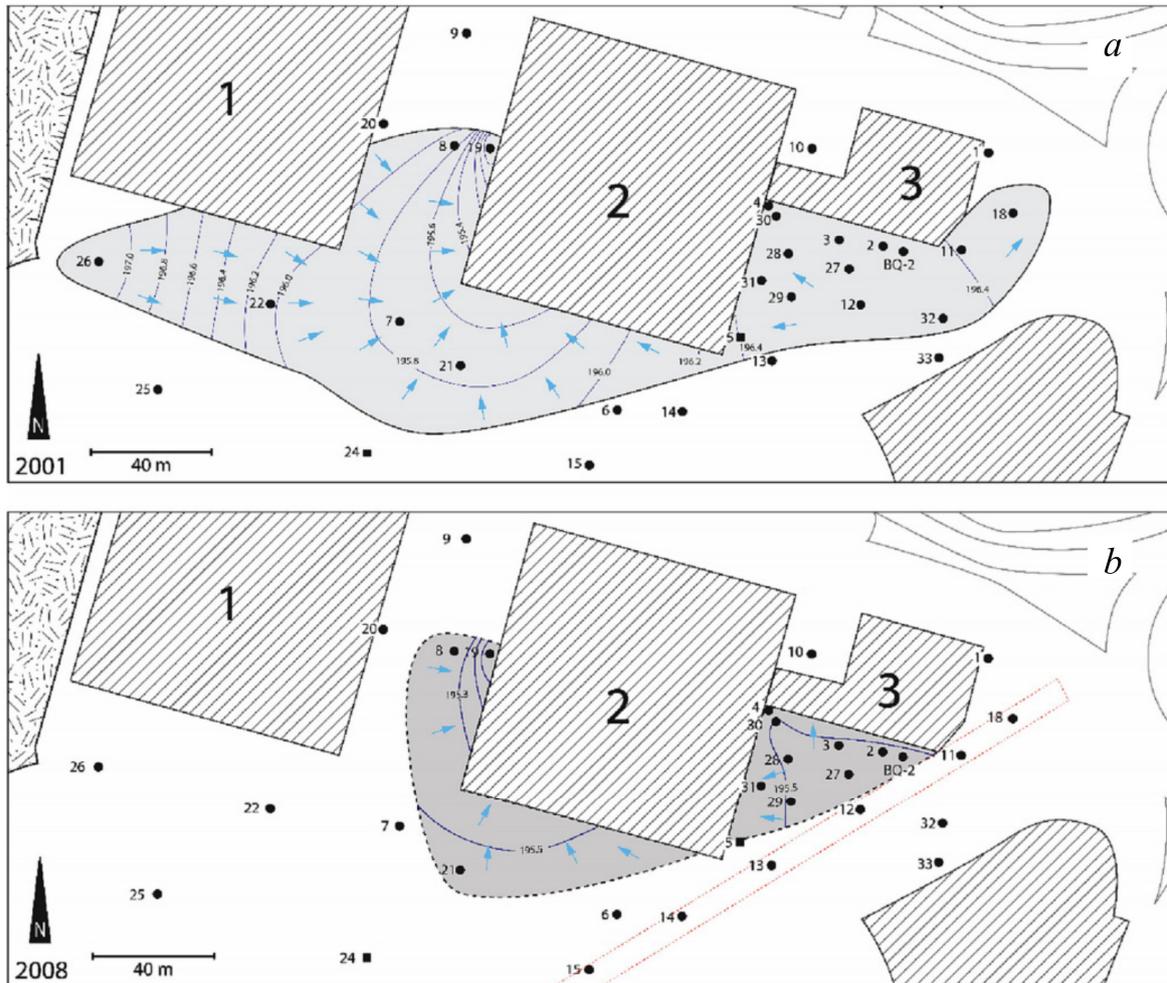


Рис. 4. Расширение и режим стока исследуемой верховодки: *a* – в 2001 г. и *b* – 2008 г. [23]

Fig. 4. Extension and groundwater flow regime of the investigated perched aquifer:

*a* – in 2001 and *b* – 2008 [23]

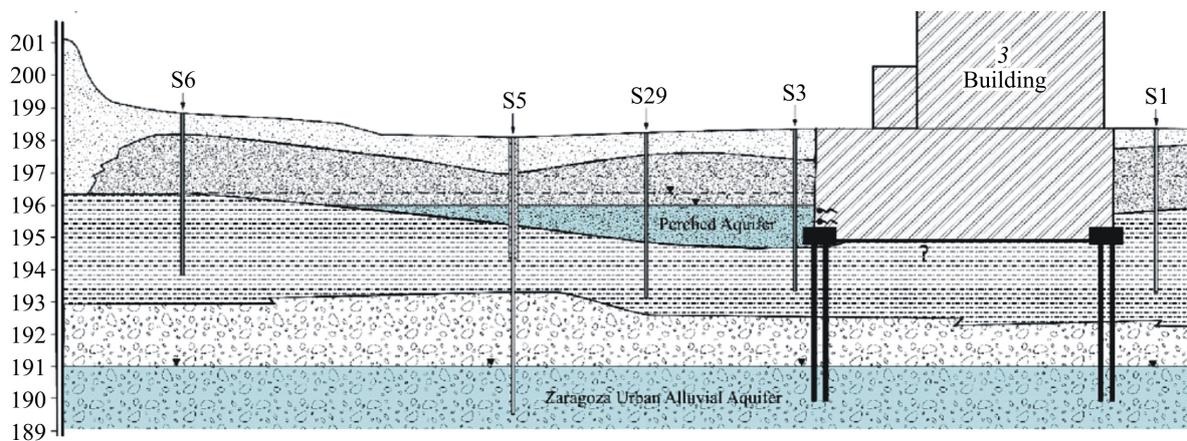


Рис. 5. Гидрогеологический разрез, отражающий положение верховодки и ее связь со зданием 3 [20]

Fig. 5. Hydrogeological cross-section reflecting the situation of the perched aquifer

and its relation to building 3 [20]

Дальнейшее развитие темы исследования по техногенным верховодкам можно связать с уточнением фильтрационного эффекта оттока инфильтрационной влаги под слабопроницаемыми линзами с учётом сопротивления грунтового воздуха. Тут возникает потребность решения новых классов подобных фильтрационных задач, которые обычно связывают с геологией нефти и газа [24].

## Заключение

Таким образом, в представленной работе проанализировано образование техногенной верховодки при наличии дополнительной инфильтрации влаги на поверхность искусственных неоднородностей с пониженной проницаемостью. Произведён обзор имеющихся решений предшествующих исследователей в нашей стране и за рубежом. Предложены две расчётные схемы образования верховодки на слабопроницаемых линзах. Дополнительно обосновано граничное условие стока подземной влаги с искусственных включений. Оговорено дальнейшее возможное развитие темы исследования, даны направления развития класса подобных фильтрационных задач. Предпринятые аналитические исследования проверены численным моделированием с оценкой погрешностей расчётов. Полученные инженерные формулы рекомендованы к использованию в геотехнической практике для фильтрационных расчётов техногенной верховодки в условиях реконструируемой городской застройки.

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

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

**Вклад 100 %.**

## Библиографический список

1. Huggenberger, P. Urban geology. Process-oriented concepts for adaptive and integrated resource management / P. Huggenberger, E. Jannis. – Basel: Springer, 2011. – 233 p.
2. Gattinoni, P. Engineering geology for underground works / P. Gattinoni, E. Pizzarotti, L. Scesi. – Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2014. – 312 p.
3. Kringel, R. Mass balance of nitrogen and potassium in urban groundwater in Central Africa / R. Kringel // Science of the Total Environment. – 2016. – No. 547. – P. 382. DOI: 395.10.1016/j.scitotenv.2015.12.090
4. Briaud, J.L. Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils / J.L. Briaud. – Wiley, 2013. – 1024 p.
5. Cushman, J.H. The handbook of groundwater engineering / J.H. Cushman, D.M. Tartakovsky. – CRC Press, 2016. – 1074 p.
6. Кудашева, М.И. Влияние процесса водонасыщения глинистого грунта основания на дополнительные осадки 5-этажного здания на ленточном фундаменте мелкого заложения / М.И. Кудашева, С.В. Калошина, Д.Г. Золотозубов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 70–81. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.07
7. Анализ причин появления подземной и атмосферной воды в подвальных помещениях эксплуатируемого здания / А.И. Полищук, Д.А. Чернявский, В.В. Гуменюк, Г.Г. Солонов // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 86–96. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.08

8. Сологаев, В.И. Совершенствование фильтрационных расчетов в условиях подтопления строительных выработок с ограждениями / В.И. Сологаев // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 3. – С. 50–62. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.05
9. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем / под ред. Н.Н. Веригина. – М.: Колос, 1970. – 440 с.
10. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
11. Язев, В.А. Численные методы в MathCAD / В.А. Язев, И.С. Лукьяненко. – СПб.: Лань, 2022. – 116 с.
12. Dechaumphai, P. Numerical methods in science and engineering. Theories with MATLAB, Mathematica, Fortran, C and Python Programs / P. Dechaumphai, N. Wansophark. – Oxford: Alpha Science International, 2021. – 388 p.
13. Kadry, S. Mathematics for engineers and science labs using Maxima / S. Kadry, P. Awad. – Toronto: Apple Academic Press, 2019. – 285 p.
14. Сологаев, В.И. Фильтрационные расчеты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: монография / В.И. Сологаев. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. – 416 с.
15. Казаринов, А.Е. Изыскания и проектирование автомобильных дорог на участках местности с верховодкой / А.Е. Казаринов, В.В. Лопашук // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения. Междунар. сб. науч. тр. – Хабаровск, 2021. – С. 20–29.
16. Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска / М.С. Шкиря, Ю.К. Ланкин, С.А. Терешкин, А.В. Лазурченко, Ю.А. Давыденко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 11. – С. 160–170.
17. Грязнова, Е.М. Влияние геологического строения территории на подтопление подвалов зданий / Е.М. Грязнова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 9 (765). – С. 46–54.
18. Hydrogeological framework of the volcanic aquifers and groundwater quality in Dangila Town and the surrounding area, Northwest Ethiopia / M.C. Fenta, Z.L. Anteneh, J. Szanyi, D. Walker // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2020. – No.11. – P. 100408. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100408
19. Characterizing the vadose zone and a perched aquifer near the Vosges ridge at the La Soutte experimental site, Obernai, France / P. Sailhac, M. Bano, M. Behaegel, J.F. Girard, E.F. Para, J. Ledo, G. Marquis, P.D. Matthey, J. Ortega-Ramírez // *Internal geophysics (Applied geophysics)*. C.R. Geoscience. – 2009. –No. 341. – P. 818–830. DOI: 10.1016/j.crte.2009.07.015
20. Peleg, N. Groundwater flow modeling of two-levels perched karstic leaking aquifers as a tool for estimating recharge and hydraulic parameters / N. Peleg, H. Gvirtzman // *Journal of Hydrology*. – 2010. – Vol. 388, iss. 1–2. – P. 13–27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.015
21. Multidisciplinary study with quantitative analysis of isotopic data for the assessment of recharge and functioning of volcanic aquifers: Case of Bromo-Tengger volcano, Indonesia / A. Toulhier, B. Baud, V. Montety, P. Lachassagne, V. Leonardi, S. Pistre, J.M. Dautria, H. Hendrayana, M.H.M. Fajar, A.S. Muhammad, O. Beon, H. Jourde // *Journal of Hydrology*. – 2019. – No. 26. – P. 100634. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100634

22. Groundwater recharge assessment at local and episodic scale in a soil mantled perched karst aquifer in southern Italy / V. Allocca, P.D. Vita, F. Manna, J.R. Nimmo // *Journal of Hydrology*. – 2015. – Vol. 529, iss. 3. – P. 843-853. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.032
23. The genesis of an extremely acidic perched aquifer within roasted pyrite waste in a fully urbanized area (Zaragoza, Spain) / J.J. Beltrán, M.A. Marazuela, C. Baquedano, J. Martínez-León, J.A.S. Navarro, N. Cruz-Pérez, J.C. Santamarta, A. García-Gil // *Science of the Total Environment*. – 2023. – No. 896. – P. 165293. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165293
24. Баренблатт, Г.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1984. – 211 с.

## References

1. Huggenberger P., Jannis E. *Urban geology. Process-oriented concepts for adaptive and integrated resource management*. Springer, Basel, 2011, 233 p.
2. Gattinoni P., Pizzarotti E., Scesi L. *Engineering geology for underground works*. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2014, 312 p
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.
5. Cushman J.H., Tartakovsky D.M. *The Handbook of groundwater engineering*. CRC Press, 2016, 1074 p.
6. Kudasheva M.I., Kaloshina S.V., Zolotozubov D.G. The influence of the process of water saturation of clay soil of the base on additional drafts of a 5-storey building on a strip foundation shallow. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, vol. 9, iss. 1, pp. 70-81. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.07.
7. Polishchuk A.I., Chernyavskiy D.A., Gumenyuk V.V., Solonov G.G. Analysis of causes of underground and atmospheric water in basements of the building in operation. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 2, pp. 86-96. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.08.
8. Sologayev 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.
9. *Metody fil'tratsionnykh raschetov gidromeliorativnykh sistem [Methods of filtration calculations of irrigation and drainage systems]*. Ed. N.N. Verigin. Moscow, Kolos, 1970, 440 p.
10. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam [Handbook of ordinary differential equations]*. Moscow, Nauka, 1976, 576 p.
11. Yazev V.A., Luk'yanenko I.S. *Chislennyye metody v MathCAD [Numerical methods in MathCAD]*. Saint Petersburg, Lan', 2022, 116 p.
12. Dechaumphai P., Wansophark N. *Numerical methods in science and engineering. Theories with MATLAB, Mathematica, Fortran, C and Python Programs*. Oxford, Alpha Science International, 2021, 388 p.
13. Kadry S., Awad P. *Mathematics for engineers and science labs using Maxima*. Toronto, Apple Academic Press, 2019, 285 p.
14. Sologayev V.I. *Fil'tratsionnyye raschety i komp'yuternoye modelirovaniye pri zashchite ot podtopleniya v gorodskom stroitel'stve [Filtration calculations and computer modeling for waterlogging protection in urban construction]*. Omsk, SibADI, 2002, 416 p.

15. Kazarinov A.Ye., Lopashuk V.V. Izyskaniya i proyektirovaniye avtomobil'nykh dorog na uchastkakh mestnosti s verkhovodkoy [Survey and design of highways in areas with high water table]. *Dal'niy Vostok. Avtomobil'nyye dorogi i bezopasnost' dvizheniya. Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov*, Khabarovsk, 2021, pp. 20-29.

16. Shkirya M.S., Lankin Yu.K., Tereshkin S.A., Lazurchenko A.V., Davydenko Yu.A. Primeneniye nazemnykh geofizicheskikh issledovaniy metodom elektrotomografii v sostave inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy podtaplivayemoy territorii odnogo iz zhilykh rayonov g. Irkutska [Application of ground geophysical surveys by electrotomography method as part of engineering-geological surveys of flooded territory of one of the residential areas of Irkutsk]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 160-170.

17. Gryaznova Ye.M. Vliyaniye geologicheskogo stroyeniya territorii na podtopleniye podvalov zdaniy [Influence of geological structure of the territory on waterlogging of building basements]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*, 2022, no. 9 (765), pp. 46-54.

18. Fenta M.C., Anteneh Z.L., Szanyi J., Walker D. Hydrogeological framework of the volcanic aquifers and groundwater quality in Dangila Town and the surrounding area, Northwest Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, no. 11, p. 100408. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100408.

19. Sailhac P. [et al.]. Characterizing the vadose zone and a perched aquifer near the Vosges ridge at the La Soutte experimental site, Obernai, France. *Internal geophysics (Applied geophysics). C. R. Geoscience*, 2009, no. 341, pp. 818–830. DOI: 10.1016/j.crte.2009.07.015.

20. Peleg N., Gvirtzman H. Groundwater flow modeling of two-levels perched karstic leaking aquifers as a tool for estimating recharge and hydraulic parameters. *Journal of Hydrology*, 2010, vol. 388, iss. 1–2, pp. 13-27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.015.

21. Toulhier A. [et al.]. Multidisciplinary study with quantitative analysis of isotopic data for the assessment of recharge and functioning of volcanic aquifers: Case of Bromo-Tengger volcano, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 2019, no. 26, p. 100634. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100634.

22. Allocca V., Vita P.D., Manna F., Nimmo J.R. Groundwater recharge assessment at local and episodic scale in a soil mantled perched karst aquifer in southern Italy. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 529, iss. 3, pp. 843-853. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.032.

23. Beltrán J.J. [et al.]. The genesis of an extremely acidic perched aquifer within roasted pyrite waste in a fully urbanized area (Zaragoza, Spain). *Science of the Total Environment*, 2023, no. 896, p. 165293. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165293.

24. Barenblatt G.I., Yentov V.M., Ryzhik V.M. Dvizheniye zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh [Movement of liquids and gases in natural formations]. Moscow, Nedra, 1984, 211 p.