



## Вычисление радиуса влияния с заданной погрешностью при неустановившемся режиме фильтрации

К.Л. Уткин<sup>1</sup>, О.Н. Уткина<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Гуманитарный университет профсоюзов, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Неустановившийся режим фильтрации приводит к повышенной нагрузке на дренажные системы, что в некоторых случаях может привести к нарушению нормальных условий эксплуатации сооружений. В научной и учебно-методической литературе его изучению уделяется недостаточно внимания. Различные методики, используемые для расчета основного параметра неустановившегося режима – радиуса влияния депрессионной воронки, не всегда ведут к одинаковым значениям, а также не позволяют определить погрешность выполненных расчетов. Систематизированный обзор научной, нормативной и учебной литературы по расчету параметра неустановившегося режима фильтрации был выполнен с применением общенаучных методов анализа и синтеза, а также методов математического анализа. Результаты проведенного исследования показали, что глобально сложились два теоретических подхода для определения радиуса влияния, но ни один из них не учитывает погрешности производимых вычислений. В статье авторами приводится математическое обоснование вычисления радиуса влияния с заданной погрешностью с применением информационных технологий.

**Ключевые слова:** дренаж, неустановившийся режим, депрессионная воронка, радиус влияния, погрешность, электронные таблицы

**Для цитирования:** Уткин К.Л., Уткина О.Н. Вычисление радиуса влияния с заданной погрешностью при неустановившемся режиме фильтрации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 3. С. 592–607. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-592-607>. EDN: ORSZLV.

### Original article

## Calculation of the radius of influence with a specified error at transient filtration mode

Kirill L. Utkin<sup>1</sup>, Oksana N. Utkina<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg University of Humanities and Social Sciences, St. Petersburg, Russia

**Abstract:** A transient filtration mode leads to an increased load on drainage systems and can potentially violate the normal operating conditions of structures. The mode is yet to be investigated in science and methodology. Various methodologies used for calculating the key parameter of the transient filtration mode – the radius of influence of the depression cone – often fail to obtain the same values and to provide a means to determine the error in the calculations performed. A systematic review of scientific, regulatory and educational literature on the calculation of parameters in the transient filtration mode was carried out using general analysis and synthesis, as well as mathematical analysis. The results of the study described two main theoretical approaches for determining the radius of influence; however, neither of them takes into account the errors in the calculations performed. The authors of the present paper provide a mathematical justification for calculating the radius of influence with a specified error using information technologies.

**Keywords:** drainage, unsteady mode, unsteady mode parameters, depression funnel, radius of influence, inaccuracy, spreadsheets

**For citation:** Utkin K.L., Utkina O.N. Calculation of the radius of influence with a specified error at transient filtration mode. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(3):592-607. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-592-607>. EDN: ORSZLV.

## ВВЕДЕНИЕ

Роль дренажной системы для общества трудно переоценить. Значимость правильно организованного дренажа актуальна для любой инфраструктуры, особенно в условиях сильных осадков, т. е. в условиях неустановившегося режима фильтрации. В качестве примера можно привести нередко встречающиеся подтопление футбольных полей<sup>1</sup>, метро<sup>2</sup> и проч. Справиться с повышенным количеством жидкости удается с помощью дренажной системы и ручного труда работников инфраструктуры. Для современных исследователей актуальны темы оценки баланса подземных вод [1–3], подтопления фундамента устаревшего фонда зданий культурного назначения [4, 5], градостроительства на неудобных территориях Российской Федерации [6–9]. В работе [10] автор указывает на необходимость включения в реестр недвижимости информации о зонах затопления и подтопления, а также применения защитных мер для предотвращения негативного воздействия воды на эти территории. По мнению автора [11], для усиления защитных мер от подтопления объектов строительства может выступать корректировка методики расчета ущерба от деградации почв и земель.

В работах [12,13] также отмечается потребность совершенствования нормативной базы в области инженерной защиты от затопления и подтопления зданий и сооружений. Следовательно, несмотря на достаточно большое количество современных научных работ в области проведения дренажных работ на затопляемых и подтопляемых территориях авторами отмечается необходимость дальнейших исследований как прикладного, так и фундаментального характера. Больше внимания в научных работах, учебной литературе и нормативной документации уделяется изучению установившегося (стационарного и квазистационарного) ре-

жима, в противовес неустановившемуся режиму. Поискам решения задач неустановившейся фильтрации занимались Жозеф Валантен Буссинеск, Николай Николаевич Веригин, Николай Егорович Жуковский, Евгений Ефимович Керкис, Иван Павлович Кусакин, Пелагея Яковлевна Полубаринова-Кочина и др. Среди современных работ можно указать исследования Сали Нафасовича Бабакаева, Файзиева Хомитхона, Дениса Сергеевича Джафарова, Ольги Владимировны Дударевой и др. [14–16]<sup>3</sup>. Иван Павлович Кусакин совершенно справедливо отмечал, что «...следует измерять положение уровня грунтов вод тогда, когда это положение является наивысшим» [18], т. е. требуется учет и дополнительное изучение параметров дренажных систем при неустановившемся режиме фильтрации. Основным из таких параметров является радиус влияния депрессионной воронки.

Для расчета неустановившегося радиуса влияния депрессионной воронки существует множество методик, которые при одинаковых исходных данных не всегда ведут к одинаковым значениям. Опытные данные и применение аналитических расчетов зачастую дают не только различные значения, но и не позволяют определить погрешность выполненных расчетов, «...служат лишь для оценок в первом приближении» [14]. Связано это со сложностью проектируемых дренажных систем и неоднородностью структуры водоносных пластов.

Цель исследования заключается в выявлении возможности вычисления радиуса влияния депрессионной воронки в условиях неустановившегося режима фильтрации с заданной погрешностью.

Объектом исследования является вычисление параметров неустановившегося режима фильтрации. Предмет исследования – вычисление радиуса влияния депрессионной воронки при неустановившемся режиме филь-

<sup>1</sup>Коптева К. Затопило футбольное поле // IvanovoNews. 2019. Режим доступа: <https://www.ivanovonews.ru/reports/1266140> (дата обращения: 24.12.2023).

<sup>2</sup>Качан А. Станцию московского метро затопил дождь // Lenta.ru. 2023. Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2023/07/26/zator> (дата обращения: 24.12.2023).

<sup>3</sup>Джафаров Д.С. Математическое моделирование диссоциации газогидратов в приложении к интерпретации исследований скважин газогидратных месторождений на нестационарных режимах фильтрации: диссертация ... к.т.н.: 18.11.2015. М., 2015. 120 с.

трации с заданной погрешностью. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи исследования:

- изучена научная, нормативная и учебная литература по предметной области;
- в хронологическом порядке проанализированы формулы и способы для определения радиуса депрессии;
- проанализированы условия применения указанных формул;
- выполнена сравнительная характеристика;
- предложен способ вычисления радиуса влияния с заданной точностью с использованием современных информационных технологий и с помощью теории математического анализа.

**МЕТОДЫ**

В работе применялся метод систематизированного обзора источников. В качестве информационной базы исследования выступают научная, нормативная и учебная литература,

статьи, включенные в наукометрическую базу Российского индекса научного цитирования, по расчету параметров неустановившегося режима фильтрации. При выполнении обзора использовали общенаучные методы анализа и синтеза. Для представления и структурирования результатов исследования был привлечен математический аппарат.

Исследование основано на принципах объективности и системности.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Обратимся к официальной литературе и проследим в относительно хронологическом порядке предлагаемые подходы для вычисления радиуса депрессии водопонижительной системы при неустановившемся режиме фильтрации. Выполненный анализ показал, что помимо опытного способа определения радиуса влияния, глобально сложились два теоретических – как зависимости  $R = R(r_c, a, t)$  и  $R = R(r_c, E_i(r_c, a, t))$  с помощью интегральной показательной функции (таб. 1).

**Таблица 1.** Формулы определения радиуса депрессии при неустановившемся режиме фильтрации водопонижительной системы

**Table 1.** Formulae for determining the radius of influence in the unsteady filtration mode of the dewatering system

Год	Формула	Номер формулы	Ограничения, примечание	Источник
1935	$R_t = 47 \sqrt{\frac{6HkT}{p}}$	(1)	Для сравнительно малых T, без инфильтрации, безнапорные (Кусакин И.П., С. 114)	Кусакин И.П. [18]
	$R_t = 60 \sqrt{\frac{6HkT}{p}}$	(2)	Для сравнительно малых T, без инфильтрации, безнапорные (Шульце И., С. 114)	
	$R_t = 74 \sqrt{\frac{6HkT}{p}}$	(3)	Для сравнительно малых T, без инфильтрации, безнапорные (Вебер М., С. 114)	
	$R_t = \sqrt{\frac{12t}{p} \frac{qk}{\pi}}$	(4)	(Kozeny J., С. 117)	
	$R_t = 575 s\sqrt{Hk}$	(5)	Ненапорный мелкозернистый грунт (Кусакин И.П., С. 202)	
1960	$R_t = 47 \sqrt{\frac{6kHT}{\mu}}$	(6)	(Кусакин И.П., С. 125)	Абрамов С.К. [19]
	$R_t = \sqrt{3 \frac{k}{\mu} h_a t}$	(7)	Для линейных дренажных систем (Лембке К.Э., С. 135)	
	$E_i \approx Ln \frac{2,25at}{r^2}$	(8)	(Бочеввер Ф.М., С. 149)	
1960	$R_\infty = \alpha \sqrt{\frac{kdH}{k_*}}$	(9)	Для предельного значения радиуса влияния (С. 614)	Полубаринова-Кочина П.Я. [19]

## Продолжение табл. 1

Год	Формула	Номер формулы	Ограничения, примечание	Источник
1962	(1), (2), (3), (5)		Перечислены формулы радиуса влияния Кусакина И.П., Вебера М., Шульце И. (С. 125)	Справочник гидрогеолога
	$R_t = 2 \sqrt{\frac{HKt}{\mu}}$	(10)		
	$R_t = \sqrt{3 \frac{K}{\mu} H_s t}$	(11)		
	$R_t = 2 \sqrt{\frac{kHt}{\mu}}$	(12)	Для контурных дренажных систем (Кусакин И.П., С. 563)	
1962	$R = 1,5\sqrt{at}$	(13)	Неподвижный контур (Веригин Н.Н., С. 21)	Методические рекомендации <sup>4</sup>
1963	$R(t) \approx 2\sqrt{at}$	–	Если радиус депрессии R(t) много больше r <sub>c</sub> (С. 284)	Чарный И.А. [20]
	$E_i \approx \text{Ln} \frac{2,25at}{r^2}$	–	При малых значениях (С. 268, 297)	
1963	$E_i \approx \text{Ln} \frac{2,25at}{r^2}$	–	Для $\frac{r^2}{4at} < 0,1$ (С. 10)	Бочеввер Ф.М. [21]
1965	$E_i \approx \text{Ln} \frac{2,25at}{r^2}$	–	Для $\frac{r^2}{4at} < 0,05 \div 0,1$ (С. 95)	Бочеввер Ф.М. Гармонов И.В. [22]
1968	$R = r_0 + 1,5\sqrt{at}$	(14)	Без питания, формула справедлива до момента времени, когда депрессия достигает естественных границ питания или стока водоносного горизонта (С. 101)	Абрамов С.К., Скиргелло О. Б. [23]
	$R = 1,73 \sqrt{\frac{kHt}{\mu}}$	(15)	Длинные горные выработки или линейные системы, отсутствие инфильтрации (С. 102)	
	$R = H \sqrt{\frac{k}{2\omega} (1 - e^{-\frac{6\omega t}{\mu H}})}$	(16)	Длинные горные выработки или линейные системы, наличие инфильтрации (С. 102)	
1970	$R_n = 1,5\sqrt{at}$	(17)	(С. 42)	Биндеман Н.Н., Язвин Л.С. [24]
1972	$R_t = \sqrt{3 \frac{k}{\mu} Ht}$	(18)	Для линейных дренажных систем (Лембке К.Э., С. 60 ссылка [21])	ВСН 045-72 <sup>5</sup>
	$R_t = 2 \sqrt{\frac{kHt}{\mu}}$	(19)	Для контурных дренажных систем (Кусакин И.П., С. 60)	
	$R_t = r_0 + 1,5 \sqrt{\frac{kHt}{\mu}}$	(20)	Более точная формула для контурных дренажных систем, (С. 60 [23])	

<sup>4</sup>Докукин А.В. Методические рекомендации по изучению условий формирования и прогнозированию притоков воды в очистные выработки при выемке угольных пластов лавами по падению. М.: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1981. 46 с.

<sup>5</sup>Ведомственные строительные нормы. Указания по проектированию дренажа подземных гидротехнических сооружений. Указания № 2 ВСН 045-72. МЭИЭ СССР. Гидротехнические сооружения. 114 с.

Продолжение табл. 1

Год	Формула	Номер формулы	Ограничения, примечание	Источник
1974	$R = \sqrt{12at}$	(21)	Неограниченный изолированный однородный горизонт (С. 43)	Методические указания
	$E_i \approx \text{Ln} \frac{2,25at}{r^2}$	–	Для $r < 0,6\sqrt{at}$ (С. 20)	
1975	$E_i \approx \text{Ln} \frac{2,25at}{r^2}$	–	«При достаточно малых значениях аргумента» (С. 112)	Керкис Е.Е. [25]
1978	$R_n = 1,5 \frac{r_0}{r_0'} \sqrt{at}$	(22)	Приведенный радиус влияния Неограниченный однослойный (С. 27)	Надарейшвили А.В. [26]
	$E_i \approx \text{Ln} \frac{2,25at}{r^2}$	–	При достаточно малых значениях аргумента (С. 8)	
1979	$R = r_k + \sqrt{\alpha at}$	(23)	Неограниченный пласт (С. 348)	Справочное руководство гидрогеолога <sup>6</sup>
1985	$R = r + 1,7\sqrt{a_{lc}t},$ $a_{lc} = \frac{kh}{\mu_{lc}}$	(24)	Безнапорная фильтрация (С. 439)	Основания, фундаменты и подземные сооружения [27]
	$R = r + 1,5\sqrt{a_{pc}t},$ $a_{pc} = \frac{kh}{\mu_{pc}}$	(25)	Напорная фильтрация (С. 439)	
	$E_i \approx \text{Ln} \frac{2,25at}{r^2}$	–	Для $\frac{r^2}{4at} < 0,1$ (С. 443)	
	Значения для интегральной показательной функции приведены в таблице	–	Для $0 < \frac{r^2}{4at} < 15,0$ (С. 443)	
1986	$R = p\sqrt{at}$	(26)	(С. 6)	ПНИИИС Госстроя СССР <sup>7</sup>
1990	$R_\omega = r_\omega + 1,7 \sqrt{\frac{k_\varphi(H_\omega - \frac{S_\omega}{2})t}{\mu}}$	(27)	Для непродолжительного начального периода при безнапорной фильтрации (с. 119)	Костерин Э.В.
1991	$r_d = r + 2\sqrt{a_{lc}t},$ $a_{lc} = \frac{kh}{\mu_g}$	(28)	Безнапорная фильтрация (С. 196)	Пособие по проектированию
	$r_d = r + 1,5\sqrt{a_{pc}t},$ $a_{pc} = \frac{kh}{\mu_e}$	(29)	Напорная фильтрация (С. 196)	
	$E_i \approx \text{Ln} \frac{2,25at}{r^2}$	–	Для $\frac{r^2}{4at} < 0,1$ (С. 199)	
	Значения для интегральной показательной функции приведены в таблице	–	Для $0 < \frac{r^2}{4at} < 5,0$ (С. 198–199)	

<sup>6</sup>Максимов В.М., Бабушкин В.Д., Веригин Н.Н. и др. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 1. Л.: Недра, 1979. 512 с.

<sup>7</sup>Рекомендации по выбору гидрогеологических параметров для обоснования способа дренирования подтопленных городских территорий/ ПНИИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1986. 56 с.

## Окончание табл. 1

Год	Формула	Номер формулы	Ограничения, примечание	Источник
2009	$R_t = 1,5\sqrt{at}$	(30)	При безнапорной и напорной фильтрации (С. 241)	Гальперин А.М.
	$R_t = 1,73\sqrt{at}$	(31)	Одиночные горные выработки (С. 339)	
	Значения для водопритоков приведены в таблице	–	Определение водопритоков при прорывах подземных вод (С. 355)	
2009	–	–	–	РМД50-06-2009
2012	$r_d = r + 1,5\sqrt{at}$ , где «значение величины а» $a_{lc} = \frac{kh}{\mu_g}$ , $a_{pc} = \frac{kh}{\mu_e}$	(32)	Для начального периода неустановившегося режима (депрессия не достигает области питания) (С. 43)	СП 103.13330.2012
	Значения для интегральной показательной функции приведены в таблице	–	Для $0 < \frac{r^2}{4at} < 8,0$ (С. 46)	

*Примечание:*

*Обозначения:*

$R_t, r_d, r$  – радиус влияния;

$a, a_{lc}, a_{pc}$  – коэффициент уровне- или пьезопроводности;

$t$  – время откачки воды;

$r_c$  – радиус скважины;

$r_0$  – расчетный радиус скважины;

$Q$  – величина изменения дебита скважины;

$T$  – водопроницаемость;

$\mu$  – коэффициент гравитационной водоотдачи грунта;

$E_i$  – символ интегральной показательной функции.

Рассмотрим первую зависимость  $R = R(r_c, a, t)$ . В 1935 г. Иван Павлович Кусакин в своей работе [17] предлагает математическую формулу (1) для определения «...расстояния от центра колодца до тех удаленных точек местности, где пониженный уровень грунтовой воды почти сливается с непониженным» [17]. Он доказывает, что еще три формулы (2)–(4) «...совершенно аналогичны» [17] предложенной автором «...для сравнительно малых численных значений  $T$  или абсолютной засухе» [17]. Он также отмечает, что определить радиус действия  $R$  водопонижительной системы можно только условно. Доказательным путем ученый предложил в дальнейшем использовать формулу (5), которую вывел «...на основании результатов понижений уровня ненапорных грунтовых вод» [17].

Следует отметить, что при дальнейших научных изысканиях по описанию конструкций и систем подземных дренажей разработчики зачастую применяют формулу (1). Так, например, Сергей Козмич Абрамов для вычисления «радиуса депрессии» [18] неустановившегося

движения подземных вод предлагает использовать формулу (1), но при этом вносит в нее изменения. Первоначально, в (1) в знаменателе присутствовало значение « $\rho$  – активная пористость грунта» [17], а в (6) он заменяет его на табличный коэффициент « $\mu$  – коэффициент водоотдачи дренируемых грунтов» [18].

Для линейных дренажных систем ученый предлагает применять формулу Константина Эдуардовича Лембке (7) для приблизительного вычисления радиуса зоны осушения [18].

В «Справочнике гидрогеолога» за 1962 г. для вычисления радиуса влияния представлено множество формул. Все они даны справочно и без каких-либо ограничений по применению. Предлагается в качестве расчетных формул использовать формулы (11) Константина Эдуардовича Лембке для линейных и (12) Ивана Павловича Кусакина для контурных дренажных систем.

Следует отметить неточность в описании формул, представленных в справочнике. Для формул (7) и (6) даны следующие описания переменных  $h_a$  и  $H$  соответственно:

- $h_a$  – средняя мощность осушаемой зоны, считая над пониженным уровнем воды;
- $H$  – высота (или напор) непониженного уровня подземных вод в [18].

Тогда как для аналогичных формул (11) и (12) дано пояснение: « $H_s$  и  $H$  – мощности дренируемого водоносного пласта»<sup>8</sup>.

В 1968 г. Сергей Козмич Абрамов в соавторстве с Ольгердом Болеславовичем Скиргелло предлагают уже другую формулу (14) для вычисления неустановившегося радиуса депрессии при работе дренажа в водоносном пласте, не получающем питания в пределах депрессионной воронки.

Ссылки на авторов формулы в работе не дается, но приводятся промежуточные расчеты. Смеем предположить, что разработчиками формулы (14) являются указанные авторы [23]. Здесь же приводятся формулы для вычисления радиуса депрессии длинных горных выработок или линейных систем при отсутствии (15) и наличии (16) инфильтрации.

Николай Николаевич Биндеман и Леонид Семенович Язвин в 1970 г., ссылаясь на исследования Владимира Николаевича Щелкачева, пришли к выводу, что приведенный радиус влияния скважины рассчитывается по формуле (17), где «...если воды безнапорные, то в формулу вместо величины коэффициента пьезопроводности следует поставить величину коэффициента уровнепроводности» [24].

Таким образом, формулу (17) можно рассматривать как частный случай формулы (14). В дальнейшем эта же формула (17) приводится в нормативной документации со ссылкой на Николая Николаевича Веригина [28].

В ВСН 045-72 1972 г. «...радиус депрессии безнапорных пластов при отсутствии инфильтрации» предлагается «...грубо приближенно определить» по уже известным формулам для линейных дренажных систем и для контурных дренажных систем.

Несмотря на то, что разработчики ВСН 045-72 указывают в качестве первоисточников «Справочник гидрогеолога» для (18), наблюдаем внесение изменений. Так, теперь параметр  $H$  описывается как «средняя мощность, м, дренируемого водоносного пласта в начальный момент времени», тогда как изначально это была «мощность дренируемого водоносного пласта». Кроме того, заявленная формула (20) не является точным оригиналом формулы

(14) из [23], на которую ссылаются разработчики, она представляет ее модификацию. Для неограниченного изолированного однородного горизонта с целью «предварительной оценки» радиуса предлагают воспользоваться частной формулой (21) «...учитывая, что в момент времени  $t$  здесь располагается 99 % общего объема депрессионной воронки»<sup>9</sup>.

Очевидно, что ученые стремились вывести обобщенную формулу для водоносного пласта произвольной формы. Еще в 1960 г. Пелагея Яковлевна Полубаринова-Кочина [20] предложила формулу (9) для предельного значения радиуса влияния. А в 1978 г. Анатолий Варламович Надарейшвили доказал, что в общем случае приведенный радиус влияния реальных скважин должен определяться по формуле (22), а формула (17) является лишь ее частным случаем [26].

В 1979 г. авторами «Справочного руководства гидрогеолога» была описана еще более общая формула (23) для неустановившегося движения в неограниченном пласте.

В 1985 г. авторы [27] предлагают разные формулы вычисления радиуса депрессии при безнапорной (24) и напорной (25) фильтрациях. Они схожи и различаются лишь прикорневными коэффициентами и подкорневыми сомножителями – уровне- и пьезопроводностью.

Ссылки на авторов формул в работе не дается. В списке литературы указаны три источника, в которых указанные формулы не встречаются. Смеем предположить, что разработчиками формул (24) и (25) являются авторы [27].

Через год в ПНИИИС Госстроя СССР предлагается обобщенная версия частного случая формулы (17) для вычисления радиуса депрессии дренажа при неустановившемся режиме фильтрации (26), где параметр  $p$  – это коэффициент, который является табличной величиной и определяется зависимостью  $p(\frac{r_0^2}{4at})$ . Что подразумевается под параметром  $r_0$  в документе не указано.

Изучение особенностей неустановившегося режима фильтрации продолжил Энгельс Витальевич Костерин.

Радиус депрессии при безнапорной фильтрации он предлагает вычислять по формуле (27).

Представленная формула подобна (24), в которой вместо уровнепроводности и толщины

<sup>8</sup>Альтовский М.Е. Справочник гидрогеолога. М. Госгеолтехиздат, 1962. 623 с.

<sup>9</sup>Методические указания по определению гидрогеологических параметров при разведке и освоении угольных месторождений. Л.: ВНИМИ, 1974. 140 с.

водоносного слоя подставлены соответствующие значения<sup>10</sup>.

Вслед за [27] в 1991 г. в «Пособии по проектированию» публикуются две формулы вычисления радиуса депрессии для начального периода неустановившегося режима при безнапорной и напорной фильтрации. Для напорной фильтрации формула (29) абсолютно идентичная формуле (25) [27]. Для безнапорной фильтрации формулы (28) и (24) отличаются только прикорневым коэффициентом: вместо 1,7 разработчики «Пособия по проектированию», без математических пояснений, приводят коэффициент 2<sup>11</sup>.

В учебнике для вузов «Гидрогеология» за 2009 г., авторами которого являются Анатолий Моисеевич Гальперин, Вадим Станиславович Зайцев, Геннадий Николаевич Харитоненко и Юлий Александрович Норнатов, вычисления радиуса влияния при безнапорной и напорной фильтрации вновь сводятся к одной формуле (30), а также приводится формула (31) определения радиуса влияния горной выработки в водоносных породах.

Ссылок на авторов формул, кроме общего списка литературы, нет<sup>12</sup>.

В региональном методическом документе «Дренажи в проектировании зданий и сооружений» РМД 50-06-2009 информации о характеристиках и способах вычислений параметров для неустановившегося режима фильтрации не содержится<sup>13</sup>.

В СП 103.13330.2012 от 2012 г. представлена только одна формула (32) вычисления радиуса депрессии для начального периода неустановившегося режима, при этом переменная  $a$  сформулирована как «...обобщенный знак, обозначающий при пользовании формулами, в которые он входит: при напорной фильтрации  $a_{pc}$  – пьезопроводность, при безнапорной фильтрации  $a_{lc}$  – уровнепроводность». Ссылок на авторов формул не приводится. Никаких дополнительных ограничений к формуле к водоносным пластам или дренажным системам не указано<sup>14</sup>.

Таким образом, авторами представленных работ предлагаются разные варианты формулы для вычисления радиуса влияния депрессионной воронки при неустановившемся режиме фильтрации водопонижительной системы. Обобщенно, она может быть представлена как  $R = r + b\sqrt{at}$ , где  $b$  – числовой коэффициент.

Отметим, что сами ученые указывают, что формулы пригодны к использованию для сравнительно малых численных значений времени понижения, для очень приближенного или грубого приближения вычисления радиуса влияния, с целью предварительной оценки радиуса. Сведений о величине погрешности вычислений в научных работах и справочной литературе нет.

Рассмотрим вторую зависимость  $R=R(r_c, E_i(r_c, a, t))$ , где  $E_i(u)$  – интегральная показательная функция.

В логарифмической зависимости, позволяющей определить радиус влияния,

$$\ln \frac{R}{r_c} = -\frac{1}{2} E_i \left( -\frac{r^2}{4at} \right), \quad (33)$$

особый интерес представляет решение интегральной показательной функции, предлагаемое разными авторами.

Большинство ученых решением интегральной показательной функции рассматривают функцию натурального логарифма  $\ln(r, a, t)$ . Формулу (8) без математических доказательств встречаем в 1960 г. у Сергея Козмича Абрамова [18] со ссылкой на Файбиша Минаевича Бочевера.

Исаак Абрамович Чарный в 1963 г. в качестве ограничений для (8) указывает, что данная формула применима лишь при малых значениях, но при каких именно не уточняет [20].

Уточнения дают Файбиш Минаевич Бочевер и Иван Владимирович Гармонов. В работе [21] задано ограничение  $\frac{r^2}{4at} < 0,1$ , а уже в 1965 г. авторы [22] сужают промежуток до (0,05; 0,1).

Другой диапазон применения формулы приведен в «Методических указаниях».

<sup>10</sup>Костерин Э.В. Основания и фундаменты: учеб. для вузов по спец. «Строительство автомоб. дорог и аэродромов» и «Мосты и транспортные тоннели». М.: Высшая школа, 1990. 431 с.

<sup>11</sup>Пособие по проектированию защиты горных выработок от подземных и поверхностных вод и водопонижения при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений (к СНиП 2.06.14-85 «Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод» и СНиП 2.02.01-83 «Основания зданий и сооружений», разд.18 «Проектирование водопонижения») / Фундаментпроект Госстроя СССР. М.: АПП ЦИТП Госстроя СССР, 1991. 248 с.

<sup>12</sup>Гальперин А.М., Зайцев В.С., Харитоненко Г.Н., Норнатов Ю.А. Геология. Часть III – Гидрогеология: учебник для вузов. М.: Горная книга, 2009. 400 с.

<sup>13</sup>РМД 50-06-2009 Санкт-Петербург. Дренажи в проектировании зданий и сооружений. СПб.: Правительство Санкт-Петербурга, 2009.

<sup>14</sup>СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. М.: Госкомстандарт, 2012. 62 с.

По мнению разработчиков формула (8) применима при выполнении неравенства  $r < 0,6\sqrt{at}$ , т. е. на промежутке (0; 0,09). Следовательно, в справочной документации наблюдаем два способа определения решения интегральной показательной функции: по формуле (8) с ограничением для аргумента на промежутке (0; 0,1) и по значениям, приведенными в табличном виде<sup>5,8</sup>, для  $\frac{r^2}{4at} > 0$  [27]. Отметим, что при малых значениях аргумента ( $\frac{r^2}{4at} < 0,1$ ) после применения формулы (8) и формулы Дюпюи для понижения пьезометрического уровня радиус влияния депрессионной воронки будет вычисляться по формуле (17).

Выделим несколько несоответствий. В [18] в первом и во втором абзацах указано, что возможна ситуация, когда  $\frac{r^2}{4at} \leq -0,01$ .

Скорее всего, здесь закралась опечатка, поскольку ни один из сомножителей не может быть отрицательным, следовательно, частное не может быть меньше отрицательного числа.

Кроме того, в [18] приведена формула с измененной формулировкой – для «суммарного количества дренажных вод», со ссылкой на работу Исаака Абрамовича Чарного, в то время как в [20] эта формула определена для «суммарного расхода жидкости», что является более логичным. В справочных документах и научных работах значения интегральной показательной функции в табличном виде приводятся для аргументов больше 0,1. Выполненный анализ табличных данных показал, что далеко не всегда учитывается количество значащих цифр решения функции, что не позволяет сделать вывод о погрешности производимых вычислений [27]. В работе [29] неправильно указаны аргументы для приведенных значений функции – даны значения для аргументов 2,0; 3,0; 4,0; 5,0, а не 1,2; 1,3; 1,4; 1,5, как указано в таблице. Использовать табличные данные не всегда удобно, какие-то аргументы могут отсутствовать, где-то встречаются опечатки и неточ-

ности, нет возможности для определения погрешности вычислений. Улучшить ситуацию можно за счет применения IT-технологий. Анатолий Варлаамович Надарейшвили в 1978 г. упоминает опыт использования электронных вычислительных машин для массовой обработки экспериментальных данных без трудоемких вычислительных операций [26]. Он также обращает внимание, что их применение позволяет сократить время на выполнение вычислений с обеспечением высокой точности результата. Повышение точности будет достигаться за счет уменьшения погрешности решения интегральной показательной функции как суммы определенного количества слагаемых:

$$-E_i(-\alpha) = \ln \frac{1}{\alpha} - 0.5772 + \alpha - \frac{\alpha^2}{2 \cdot 2!} + \frac{\alpha^3}{3 \cdot 3!} + \dots,$$

где  $\alpha = \frac{r^2}{4at}$

Формула (8), получившая большую популярность, является суммой двух первых слагаемых интегральной показательной функции:

$$-E_i(-\alpha) = \ln \frac{1}{\alpha} - 0.5772 \approx \ln \frac{2,25at}{r^2}$$

где  $\alpha = \frac{r^2}{4at}$  при выполнении условия, что  $\alpha < 0,1$ .

Упростить функцию до трех слагаемых предлагает Евгений Ефимович Керкис [30]:

$$E_i(-x) = 0,5772 + \ln x - x$$

Он указывает, что такой формулой «...можно пользоваться при значениях  $x$  настолько малых, что величинами  $x^2$  можно пренебречь» [30], но и здесь не указана информация о погрешности получаемого решения. Анатолий Варлаамович Надарейшвили также приводит примеры вычисления функции как суммы первых четырех слагаемых и тоже без указания величины погрешности [26]. Понимание погрешности вычислений важно не только с позиции получения корректных данных, но и для осознания особенностей поведения функции, следовательно, и радиуса влияния с течением времени. В табл. 2 приведен пример изменения знака значений интегральной показательной функции при разных погрешностях вычислений.

**Таблица 2.** Значения интегральной показательной функции  $-E_i(-\alpha)$  относительно нуля при разных погрешностях вычислений (изменение знака)

**Table 2.** Values of the integral exponent function  $-E_i(-\alpha)$  relative to zero at different calculation inaccuracies (change of sign)

Погрешность вычисления	A	8	10	15
0,01		< 0	> 0	< 0
0,001		< 0	< 0	> 0
0,0001		< 0	< 0	> 0
0,00001		> 0	> 0	> 0

Возникает вопрос: сколько членов ряда необходимо и достаточно взять, чтобы обеспечить требуемую погрешность приближенного решения интегральной показательной функции? Конечно, при соблюдении количества значащих цифр у первых двух слагаемых функции.

Для начала проанализируем ряд  $R_E(\alpha)$  на сходимость:

$$R_E(\alpha) = \alpha - \frac{\alpha^2}{2 \cdot 2!} + \frac{\alpha^3}{3 \cdot 3!} + \dots$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot \alpha^n}{n \cdot n!}, \text{ для } n \in \mathbb{N} \text{ и } \alpha = \frac{r^2}{4at}$$

Воспользуемся признаком Лейбница, который гласит, что если общий член знакопеременующегося ряда, монотонно убывая по модулю, стремится к нулю, то ряд сходится.

Доказательство:

1. Ряд является знакопеременующимся при  $\alpha > 0$ .

2. Проверим, убывают ли члены ряда монотонно по модулю. Составим разность:

$$|a_n| - |a_{n+1}| = \left| \frac{(-1)^n \alpha^n}{n \cdot n!} \right| - 1n + 1\alpha^{n+1}(n+1) \cdot (n+1)! = \frac{\alpha^n}{n!} \left( \frac{1}{n} - \frac{\alpha}{(n+1)^2} \right) =$$

$$= \frac{\alpha^n}{n!} \cdot \frac{(n+1)^2 - \alpha \cdot n}{n \cdot (n+1)^2} > 0, \text{ для } n \in \mathbb{N}.$$

$$(n+1)^2 > \alpha \cdot n, \quad (34)$$

$$\alpha < \frac{(n+1)^2}{n},$$

$$\text{для } n \in \mathbb{N} \Rightarrow \alpha < \frac{(1+1)^2}{1} = 4$$

Таким образом, для  $\alpha \in (0; 4)$  члены ряда монотонно убывают.

3. Найдем предел модуля общего члена ряда. Воспользуемся признаком д'Аламбера:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(-1)^{n+2} \cdot \alpha^{n+1}}{(n+1) \cdot (n+1)!} \cdot \frac{n \cdot n!}{(-1)^{n+1} \cdot \alpha^n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\alpha \cdot n}{(n+1)^2} \right|$$

$$= \alpha \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{1}{2n+2} \right| = 0$$

Делаем вывод, что для любого  $\alpha \in (0; 4)$  ряд сходится.

Предел  $n$ -го члена ряда стремится к нулю, а значит ряд  $RE(\alpha)$  на  $(0; 4)$  удовлетворяет

условиям Лейбница. Тогда погрешность, получаемая при замене суммы ряда его частичной суммой  $Rep(\alpha)$ , не будет превосходить по абсолютной величине первый отбрасываемый член ряда.

Оценим, к какому числу сходится ряд  $RE(\alpha)$  для  $\alpha \in (0; 4)$ .

Продифференцируем ряд:

$$R'_E(\alpha) = \left( \alpha - \frac{\alpha^2}{2 \cdot 2!} + \frac{\alpha^3}{3 \cdot 3!} - \frac{\alpha^4}{4 \cdot 4!} + \frac{\alpha^5}{5 \cdot 5!} + \dots \right)'$$

$$= 1 - \frac{\alpha}{2!} + \frac{\alpha^2}{3!} - \frac{\alpha^3}{4!} + \frac{\alpha^4}{5!} + \dots =$$

$$= \frac{\left( -\alpha + \frac{\alpha^2}{2!} - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^4}{4!} - \frac{\alpha^5}{5!} + \dots + \frac{(-\alpha)^n}{n!} + 1 \right) - 1}{- \alpha} =$$

$$= \frac{e^{-\alpha} - 1}{-\alpha}.$$

Для нахождения суммы ряда выполним интегрирование:

$$R_E(\alpha) = \int_0^{\alpha} R'_E(\alpha) d\alpha = \int_0^{\alpha} \frac{e^{-\alpha} - 1}{-\alpha} d\alpha$$

$$= \lim_{m \rightarrow \alpha} \int_0^m \frac{e^{-\alpha} - 1}{-\alpha} d\alpha =$$

$$= \lim_{m \rightarrow \alpha} \left[ - \int_0^m \left( \left(1 - \frac{\alpha}{m}\right)^m - 1 \right) \frac{d\alpha}{\alpha} \right]$$

$$= \lim_{m \rightarrow \alpha} \left[ 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{m} \right]$$

То есть для  $m \rightarrow \alpha$  и  $\alpha \in (0; 4)$ , сумма ряда  $RE(\alpha) \rightarrow 2,08(3)$ .

Тогда найденная сумма ряда при  $\alpha \rightarrow 4$  значима и сопоставима со значениями первых двух слагаемых интегральной показательной функции.

Сама функция на промежутке  $(0; 4)$ :

$$-E_i(-4) \rightarrow -1,386294 - 0,577216 + 2,083333 \approx 0,119823$$

А что будет с интегральной показательной функцией при  $\alpha \geq 4$ ?

Решив квадратное уравнение (34) относительно переменной  $n$  при  $\alpha \geq 4$ , имеем:

$$n_{y6} = \frac{\alpha}{2} - 1 + \frac{\sqrt{(\alpha - 2)^2 - 4}}{2}$$

Для  $\alpha \geq 4$  члены ряда будут монотонно убывать по модулю только начиная со слагаемого с номером  $n_{y6}$ . Так, для  $\alpha=4$ , члены ряда  $R(\alpha)$  будут монотонно убывать, начиная со слагаемого  $n_{y6}=2$ . Для  $\alpha=5$ , члены ряда  $R(\alpha)$  будут монотонно убывать, начиная с  $n_{y6}=3$  слагаемого, для  $\alpha=8$  с  $n_{y6}=6$  слагаемого и т. д.

Примечательно, что Анатолий Моисеевич Гальперин, со ссылкой на Валерия Александровича Мироненко, отдельно выделяет значения интегральной показательной функции именно для аргументов больших 4.

Таким образом, при нахождении суммы ряда  $R(\alpha)$  для  $\alpha$  из промежутка  $[4; +\infty)$  необходимо учитывать первые  $n_{уб}$  членов ряда, для которых не выполняется условие монотонного убывания.

Следующие за ними члены ряда необходимо проверять на требуемую погрешность вычислений, поскольку оставшийся ряд уже будет удовлетворять условиям Лейбница, и погрешность оставшейся частичной суммы не будет превосходить по абсолютной величине первый отбрасываемый член ряда.

Все эти вычисления без особых трудностей и без привлечения языков программирования, как, например, предлагают авторы работы [14], могут быть выполнены в электронных таблицах, например, в MS Excel.

На рис. 1 представлены формулы для вычисления радиуса влияния неустановившегося режима фильтрации жидкости.

В ячейку C3 вводится число, соответствующее количеству знаков после запятой требуемой погрешности.

С учетом данного значения и функции ОКРУГЛ() в ячейке C7 выполняется округление постоянной Эйлера.

В ячейке C8 заложено вычисление натурального логарифма и округление его с заданной погрешностью.

Далее, в ячейке C9 вычисляется количество первых  $n_{уб}$  членов ряда  $RE(\alpha)$ , которые необходимо учитывать при подсчете суммы ряда и которые нельзя отбрасывать, поскольку они не являются монотонно убывающими членами ряда. Общее количество членов ряда, которые необходимо сложить для получения суммы с требуемой погрешностью, вычисляется в ячейке C10. В ячейке C11 подсчитывается сумма ряда  $RE(\alpha)$ .

	A	B	C
1			$r_c$
2	Ввод данных	$\alpha = r^2 / (4at)$	
3		Погрешность: количество знаков после запятой	
4			
5		Погрешность	=СТЕПЕНЬ(10;(-1)*C3)
6		Постоянная Эйлера	0,5772156649
7		Постоянная с учетом погрешности	=ОКРУГЛ(C6;C3)
8		$\ln(1/\alpha)$	=ОКРУГЛ(LN(1/C2);C3)
9	Вычисления	Необходимо учитывать первые $n_{уб}$ члены ряда	=ОКРВВЕРХ(C2/2-1+КОРЕНЬ((C2-2)
10		Количество слагаемых для обеспечения точности	=СЧЁТ(H2:H170)
11		Сумма ряда	=ОКРУГЛ(СУММ(H2:H170);C3)
12		Функция колодца	=ОКРУГЛ(C8-C7+C11;C3)
13		Радиус влияния	=ОКРУГЛ(C1*EXP(C12)/2;C3)

**Рис. 1. Формулы для вычисления радиуса влияния.**  
**Fig. 1. Formulae for calculating the radius of influence.**

Расчет функции колодца, как алгебраической суммы постоянной Эйлера, натурального логарифма и суммы ряда  $RE(\alpha)$  выполняется в ячейке C12. В ячейке C13 вычисляется окончательное значение радиуса влияния депрессионной воронки на основе формулы (33).

В ячейках ряда H (рис. 2) приведены формулы вычисления членов ряда с учетом про-

верки на заданную погрешность. Если получаемое значение члена ряда меньше, чем требуемая погрешность, то этот член ряда игнорируется:

$$F2 = \text{СТЕПЕНЬ}(-1;E2+1)* \\ * \text{СТЕПЕНЬ}(\$C\$2;E2) / (E2 * \text{ФАКТР}(E2)) \quad G2 = \\ = \text{ЕСЛИ}(\text{ABS}(F2) < \$C\$5; "-"; F2)$$

	A	B	C	D	E	F	G
1	Ввод данных	$r_c$	200		Член ряда	Значение	Значение с учетом погрешности
2		$\alpha = r^2/(4at)$	4,10		1	4,10E+00	4,1
3		Погрешность: количество знаков после запятой	5		2	-4,20E+00	-4,2025
4					3	3,83E+00	3,828944444
5	Вычисления	Погрешность	0,00001		4	-2,94E+00	-2,943501042
6		Постоянная Эйлера	0,577215665		5	1,93E+00	1,930936683
7		Постоянная с учетом погрешности	0,57722		6	-1,10E+00	-1,099561167
8		$\ln(1/\alpha)$	-1,41099		7	5,52E-01	0,552024586
9		Необходимо учитывать первые $n_{уб}$ члены ряда	2		8	-2,48E-01	-0,247548525
10		Количество слагаемых для обеспечения точности	16		9	1,00E-01	0,100241872
11		Сумма ряда	1,99155		10	-3,70E-02	-0,036989251
12		Функция колодца	0,00334		11	1,25E-02	0,012533548
13	Радиус влияния	100,33456		12	-3,93E-03	-0,003925438	
14				13	1,14E-03	0,00114279	
15				14	-3,11E-04	-0,000310769	
16				15	7,93E-05	7,92806E-05	
17				16	-1,90E-05	-1,90459E-05	
18				17	4,32E-06	-	
19				18	-9,30E-07	-	

**Рис. 2. Вычисление радиуса влияния с учетом заданной погрешности**  
**Fig. 2. Calculation of the radius of influence taking into account the required inaccuracy**

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. На основе исследования научной, нормативной и учебной литературы была выполнена систематизация существующих подходов определения основного параметра неустановившегося режима фильтрации – радиуса депрессии.

2. На основе анализа и систематизации научной, нормативной и учебной литературы в хронологическом порядке проанализированы формулы и способы для определения радиуса депрессии, а также условия применения этих формул.

3. С помощью теории математического анализа был предложен способ вычисления радиуса депрессии с заданной точностью, поскольку, как показало исследование, ученые, описывающие различные формулы, стремились их упростить для удобства вычисления.

4. Доказана возможность применения электронных таблиц в качестве инструмента для вычисления радиуса депрессии при неустановившемся режиме фильтрации с любой наперед заданной погрешностью, поскольку мощности современных информационных технологий позволяют не задумываться о затратах, связанных с вычислительным процессом.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чупин В.Р., Йоше А.К. Оценка баланса подземных вод и их пространственного распределения в рамках миссии НАСА GRACE для р. Голубой Нил в Эфиопии (Восточная Африка) // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1. С. 76–89. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-76-89>. EDN: JNYOGM.
2. Грязнова Е.М. Влияние процесса подтопления на эксплуатационную надежность здания // Экономика строительства. 2024. № 1. С. 99–102. EDN: AWSZFB.
3. Hai V. Pham, Frank T.-C. Tsai Modeling Complex Aquifer Systems: A Case Study in Baton Rouge, Louisiana (USA) // Hydrogeology Journal. 2017. Vol. 25. P. 601–615. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1532-6>.

4. Сысоева Е.В., Анищенко И.О., Мосолова А.С., Ремизова А.А., Терехова Е.С. Обоснование необходимости реконструкции устаревшего фонда зданий культурного назначения на примере Дома культуры Побединский Скопинского района Рязанской области // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 1. С. 186–195. EDN: YJAHBG.
5. Кутуков А.А., Колокольцева Е.Н., Романова Л.С. Инженерные вопросы реставрации. Влияние роста культурного слоя на сохранность объектов культурного наследия на примере каменных храмов города Томска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 54–69. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-3-54-69>. EDN: RZLDDE.
6. Бобрышев Д.В., Неронова А.И. Типологические факторы градостроительного развития неудобных территорий в структуре прибрежных зон г. Иркутска // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1. С. 90–100. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-90-100>. EDN: LWEAUK.
7. Шевцова И.М., Игнаткина Д.О., Москвичева Е.В., Быканов И.В. Предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве (на примере г. Волгограда) // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 3 (84). С. 73–85. EDN: MYNACW.
8. Добрускина М.А., Петров А.В., Бат-Эрдэнэ З. Совершенствование технологии устройства подпорных стен в Иркутском регионе с использованием габионов коробчатого типа // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 2. С. 312–323. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-2-312-323>. EDN: KWUVDL.
9. Лукашук Е.Р., Добромиров В.Н. Условия применения самоходных строительных машин в зонах подтопления рек Арктического региона // Строительные и дорожные машины. 2022. № 6. С. 18–22. EDN: SXLSBJ.
10. Zdanova R.V., Sinitza Ju.S. Procedure for Entering Flood and Flood Zones into The Unified State Register of Real Estate // International Agricultural Journal. 2021. Vol. 64. Iss. 3. P. 1–9. <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2021-10328>. EDN: RDTTYU.
11. Яковлева И.Ю. Оценка ущерба от подтопления территории объекта незавершенного строительства // Естественные и технические науки. 2022. № 1 (164). С. 162–164. EDN: EOXEOK.
12. Сольский С.В., Шипилов А.В., Герасимова Е.В. Проблемы проектирования и нормирования при решении задач защиты от подтопления и затопления // Гидротехническое строительство. 2022. № 3. С. 7–14. EDN: EJNDRY.
13. Птушкина Г.П. Наводнения и подтопления - как показатель инженерно-технических ошибок обустройства территории города // Архитектура и время. 2023. № 5. С. 8–12. EDN: RGVLKB.
14. Файзиев Х., Бабакаев С.Н., Норматов М.У. Численное решение краевой задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах методом конечных разностей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 1 (685). С. 43–50. EDN: VTKDXD.
15. Ravshanov R., Abdullaev Z.S., Kotov E.V., Turkmanova Sh.N. Numerical Study of the Process of Unsteady Flow in A Three-Layer Porous Medium // Magazine of Civil Engineering. 2023. Vol. 119. Iss. 3. P. 1–14. <https://doi.org/10.34910/MCE.119.2>.
16. Дударева О.В. Проявление нелинейных эффектов фильтрации при нестационарных режимах работы скважины // Физика конденсированного состояния и ее приложения. Сб. трудов III Междунар. науч.-практ. конф. (г. Стерлитамак, 09–12 сентября 2020 г.). Стерлитамак, 2020. С. 30–35. EDN: YRZQAL.
17. Кусакин И.П. Искусственное понижение уровня грунтовых вод. М.: Ленинград: ОНТИ. Главная редакция строительной литературы, 1935. 247 с.
18. Абрамов С.К. Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1960. 240 с.
19. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
20. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963. 397 с.
21. Бочеввер Ф.М. Гидрогеологические расчеты крупных водозаборов подземных вод и водопонижительных установок. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. 59 с.
22. Бочеввер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1965. 307 с.
23. Абрамов С.К., Скиргелло О.Б. Осушение шахтных и карьерных полей. Способы, системы и расчеты осушения шахтных и карьерных полей. М.: Недра, 1968. 254 с.
24. Биндеман Н.Н., Язвин Л.С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1970. 216 с.
25. Керкис Е.Е. Методы изучения фильтрационных свойств горных пород. Ленинград: Недра, 1975. 231 с.

26. Надарейшвили А.В. Методы исследований опытных гидродинамических работ и явлений в системе пласт-скважина. М.: Недра, 1978. 224 с.
27. Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И., Коновалов П.А., Смородинов М.И., Сорочан Е.А. [и др.] Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.
28. Веригин Н.Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 180 с.
29. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 326 с.
30. Керкис Е.Е. Определение неустановившегося радиуса влияния при откачке из напорных водоносных горизонтов // Записки горного института. 1962. Т. 44. № 2. С. 51–55.

## REFERENCES

1. Chupin V.R., Yoshe A.K. Evaluating Groundwater Balance and Its Spatial Distribution as Part of Nasa Grace Mission for Blue Nile River (Ethiopia, East Africa). *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(1):76-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-76-89>. EDN: JNYOGM.
2. Gryaznova E.M. The Influence of the Flooding Process On the Operational Reliability of the Building. *Construction Economics*. 2024;1:99-102. (In Russ.). EDN: AWSZFB.
3. Hai V. Pham, Frank T.-C. Tsai Modeling Complex Aquifer Systems: A Case Study in Baton Rouge, Louisiana (USA). *Hydrogeology Journal*. 2017;25:601-615. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1532-6>.
4. Sysoeva E.V., Anishchenko I.O., Mosolova A.S., Remizova A.A., Terekhova E.S. Rationale for The Reconstruction of Old Cultural Buildings On the Example of The "Pobedinsky" House of Culture, Skopinsky District, Ryazan Region. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(1):186-195. (In Russ.). EDN: YJAHBG.
5. Kutukov A.A., Kolokoltseva E.N., Romanova L.S. Engineering Issues in Restoration. Cultural Deposit Growth Effect On Preservation of Stone Churches in Tomsk. *Journal of Construction and Architecture*. 2023;25(3):54-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-3-54-69>. EDN: RZLDDE.
6. Bobryshev D.V., Neronova A.I. Typological Factors of Urban Development of Inconvenient Lands in The Structure of Irkutsk Riparian Zones. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(1):90-100. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-90-100>. EDN: LWEAUk.
7. Shevtsova I.M., Ignatkina D.O., Moskvicheva E.V., Bykanov I.V. Prevention of Ground Water Flooding of Territories During Construction (For Example, Volgograd). *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture*. 2021;3(84):73-85. (In Russ.). EDN: MYNACW.
8. Dobruskina M.A., Petrov A.V., Bat-Erdene Z. Improving The Technology of Retaining Walls in The Irkutsk Region Using Gabion Baskets. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(2):312-323. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-2-312-323>. EDN: KWUVDF.
9. Lukashuk E.R., Dobromirov V.N. Conditions for The Use of Self-Propelled Construction Machines in Flood Zones of Rivers in The Arctic Region. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2022;6:18-22. (In Russ.). EDN: SXLSBJ.
10. Zdanova R.V., Sinitsa Ju.S. Procedure for Entering Flood and Flood Zones into The Unified State Register of Real Estate. *International Agricultural Journal*. 2021;64(3):1-9. <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2021-10328>. EDN: RDTTYU.
11. Yakovleva I.Yu. Assessment of Damage from Flooding of the Territory of the Construction in Progress. *Natural and Technical Sciences*. 2022;1(164):162-164. (In Russ.). EDN: EOXEOK.
12. Sol'skiy S.V., Shipilov A.V., Gerasimova E.V. The Issue of Design and Standardization Which Emerge During the Solving Problems of the Protection from Flooding and Inundation. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2022;3:7-14. (In Russ.). EDN: EJNDRY.
13. Ptushkina G.P. Floods and Flooding - As an Indicator of Engineering and Technical Errors in The Development of the City Territory. *Architecture and Time*. 2023;5:8-12. (In Russ.). EDN: RGVLKB.
14. Fayziev Kh., Babakaev S.N., Normatov M.U. Numerical Solution of the Problem of Unsteady Filtration in Earth Dams Finite Difference Method. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2016;1(685):43-50. (In Russ.). EDN: VTKDXD.
15. Ravshanov R., Abdullaev Z.S., Kotov E.V., Turkmanova Sh.N. Numerical Study of the Process of Unsteady Flow in A Three-Layer Porous Medium. *Magazine of Civil Engineering*. 2023;119(3):1-14. <https://doi.org/10.34910/MCE.119.2>.
16. Dudareva O.V. Manifestation of Nonlinear Filtering Effects During Unsteady Well Operation. In: *Fizika kondensirovannogo sostoyaniya i ee prilozheniya. Sbornik trudov III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi*

*konferentsii = Physics of Condensed Matter and Its Applications. Collection of Proceedings of The III International Scientific and Practical Conference. 09–12 September 2020, Sterlitamak. Sterlitamak; 2020. p. 30–35. (In Russ.). EDN: YRZQAL.*

17. Kusakin I.P. *Artificially Lowering the Groundwater Level*. Moscow; Leningrad: ONTI. Main Editorial Office of Construction Literature, 1935. 247 p. (In Russ.).

18. Abramov S.K. *Underground Drainage in Industrial and Urban Construction*. Moscow: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials, 1960. 240 p. (In Russ.).

19. Polubarinova-Kochina P.Ya. *Theory of Groundwater Movement*. Moscow: Nauka, 1977. 664 p. (In Russ.).

20. Charnyi I.A. *Underground Fluid Dynamics*. Moscow: Gostoptekhizdat, 1963. 397 p. (In Russ.).

21. Bochever F.M. *Hydrogeological Calculations of Large Groundwater Intakes and Water Reduction Plants*. Moscow: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials, 1963. 59 p. (In Russ.).

22. Bochever F.M., Garmonov I.V., Lebedev A.V., Shestakov V.M. *Basics of Hydrogeological Calculations*. Moscow: Nedra, 1965. 307 p. (In Russ.).

23. Abramov S.K., Skirgello O.B. *Drainage of Mine and Quarry Fields. Methods, Systems and Calculations for Draining Mine and Quarry Fields*. Moscow: Nedra, 1968. 254 p. (In Russ.).

24. Bindeman N.N., Yazvin L.S. *Assessment of Operational Groundwater Reserves*. Moscow: Nedra, 1970. 216 p. (In Russ.).

25. Kerkis E.E. *Methods for Studying the Filtration Properties of Rocks*. Leningrad: Nedra, 1975. 231 p. (In Russ.).

26. Nadareishvili A.V. *Methods for Studying Experimental Hydrodynamic Work and Phenomena in The Reservoir-Well System*. Moscow: Nedra, 1978. 224 p. (In Russ.).

27. Gorbunov-Posadov M.I., Il'ichev V.A., Krutov V.I., Konovalov P.A., Smorodinov M.I., Sorochan E.A. [et al.] *Foundations, Foundations and Underground Structures*. Moscow: Stroyizdat, 1985. 480 p. (In Russ.).

28. Verigin N.N. *Methods for Determining the Filtration Properties of Rocks*. Moscow: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials, 1962. 180 p. (In Russ.).

29. Borevskii B.V., Samsonov B.G., Yazvin L.S. *Methodology for Determining the Parameters of Aquifers Based On Pumping Data*. Moscow: Nedra, 1979. 326 p. (In Russ.).

30. Kerkis E.E. Determination of The Transient Radius of Influence During Pumping from Confined Aquifers. *Zapiski gornogo instituta*. 1962;44(2):51-55. (In Russ.).

### Информация об авторах

**Уткин Кирилл Львович**,  
магистрант,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого,  
195251, г. Санкт-Петербург,  
Политехническая ул., 29, Россия,  
e-mail: utkin.kl@edu.spbstu.ru  
Author ID: 1219893

**Уткина Оксана Николаевна**,  
к.п.н, доцент,  
Санкт-Петербургский Гуманитарный  
университет профсоюзов,  
192238, г. Санкт-Петербург, ул. Фучика, 15,  
Россия,  
✉e-mail: may08\_08@mail.ru  
Author ID: 610237

### Information about the authors

**Kirill L. Utkin**,  
Master's Student,  
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic  
University,  
29 Politechnicheskaya St., Saint Petersburg  
195251, Russia,  
e-mail: utkin.kl@edu.spbstu.ru  
Author ID: 1219893

**Oksana N. Utkina**,  
Cand. Sci. (Ped.),  
Associate Professor,  
Saint Petersburg University of Humanities  
and Social Sciences,  
15 Fuchika St., Saint Petersburg 192238, Russia,  
✉e-mail: may08\_08@mail.ru  
Author ID: 610237

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 17.06.2024.  
Одобрена после рецензирования 05.07.2024.  
Принята к публикации 08.07.2024.

#### **Information about the article**

The article was submitted 17.06.2024.  
Approved after reviewing 05.07.2024.  
Accepted for publication 08.07.2024.