

Научная статья
УДК 69.034.96
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-350-359>
EDN: YGJBPX



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТА ИЛИ МАТЕРИАЛА ПРИ ЗАЩИТЕ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.И. Сологаев

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
sologaev_vi@cdo.sibadi.org

АННОТАЦИЯ

Введение. Проницаемость грунтов и материалов является важным параметром при защите от подтопления в городском строительстве. Любую жидкость или газ называют флюидом при фильтрационном движении через пористый грунт или материал. При защите от подтопления основной жидкостью является вода, а основным газом – воздух. В данной работе обоснована аналогия движения подземных вод и воздуха. Основное внимание уделено фильтрации воздуха в грунте или материале. Предложен, теоретически обоснован и практически опробован способ определения воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве.

Методы и материалы. На основании фундаментальных законов проанализирована аналогия движения подземных вод и воздуха. Рассмотрен предложенный способ определения воздухопроницаемости грунтов и строительных материалов с помощью простого, но довольно надёжного прибора, который был сконструирован автором и испытан на многочисленных лабораторных опытах. Погрешность прибора не превышала 1%. В качестве сравнительного примера даны экспериментальные данные автора в виде графика воздушной фазовой проницаемости.

Обсуждение. Рассмотрены полученные результаты по методологии и практическому определению воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве, сопоставляемые с обзором последних публикаций, близких к теме исследования.

Заключение. Таким образом, в представленной работе проанализирована аналогия движения подземных вод и воздуха. Основное внимание уделено фильтрации воздуха в грунте или строительном материале. Предложен, теоретически обоснован и практически опробован способ определения воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве. Предпринятая тема исследования весьма актуальна, разработанная методология и способ определения воздухопроницаемости грунтов и материалов рекомендуется к практическому применению при борьбе с подтоплением в городском строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздухопроницаемость, грунт, строительный материал, защита от подтопления, городское строительство

Статья поступила в редакцию 21.05.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Сологаев В.И. Определение воздухопроницаемости грунта или материала при защите от подтопления в городском строительстве // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 350-359. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-350-359>

© Сологаев В.И., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-350-359>
EDN: YGJBPX

DETERMINATION OF AIR PERMEABILITY OF SOIL OR MATERIAL IN PROTECTION FROM FLOODING IN URBAN CONSTRUCTION

Valeriy I. Sologaev

*The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Russia, Omsk
sologaev_vi@cdo.sibadi.org*

ABSTRACT

Introduction. Permeability of soils and materials is an important parameter in flood protection in urban construction. Any liquid or gas is called a fluid when it moves by filtration through porous soil or material. In flood protection, the main liquid is water, and the main gas is air. This paper substantiates the analogy of groundwater and air movement. The main attention is paid to air filtration in soil or material. A method for determining the air permeability of soil or material for flood protection in urban construction is proposed, substantiated theoretically and tested practically.

Methods and materials. Based on fundamental laws, the analogy between underground water and air movement has been analyzed. The proposed method for determining the air permeability of soils and building materials using a simple but fairly reliable device designed by the author and tested in numerous laboratory experiments, has been considered. The error of the device did not exceed 1%. As a comparative example, the author's experimental data are given in the form of a graph of air phase permeability.

Discussion. The obtained results on the methodology and practical determination of the air permeability of soil or material for flood protection in urban construction have been considered, comparing them with a review of recent publications related to the research topic.

Conclusion. Thus, the presented work analyzes the analogy between groundwater and air movement. The main attention is paid to the filtration of air in soil or building material. A method for determining the air permeability of soil or building material for the protection against flooding in urban construction has been proposed, substantiated theoretically and tested practically. The research topic is very relevant, the developed methodology and the way of determining the air permeability of soils and building materials are recommended for practical application in the preventive actions against flooding in urban construction.

KEYWORDS: air permeability, soil, building material, flood protection, urban construction

The article was submitted: May 21, 2025; approved after reviewing: February 10, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Sologaev V.I. Determination of air permeability of soil or material in protection from flooding in urban construction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 350-359. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-350-359>

© Sologaev Valeriy I., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Проницаемость грунтов и материалов является важным параметром [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], особенно при защите от подтопления в городском строительстве. Любую жидкость или газ называют флюидом при фильтрационном движении через пористый грунт или материал. При защите от подтопления основной жидкостью является вода, а основным газом – воздух. В данной работе обоснована аналогия движения подземных вод и воздуха. Основное внимание уделено фильтрации воздуха в грунте или материале. Предложен, теоретически обоснован и практически опробован способ определения воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Основные расчёты и моделирование при защите от подтопления в городском строительстве обычно связаны с подземной водой и её фильтрационными течениями в пористых средах, грунтах и материалах. Иногда возникает потребность рассмотреть фильтрацию подземного воздуха, например, в системах строительного водопонижения, связанного с вакуумированием грунтов. Поэтому важно кроме проницаемости по воде знать проницаемость по воздуху.

Движение подземной воды и подземного воздуха может иметь аналогию, но есть некоторые отличия в этих процессах. Для примера рассмотрим сравнительное фильтрационное течение воды и воздуха через трубу, заполненную проницаемым грунтом или строительным материалом. Предположим, что на разных концах трубы длиной L , м, имеются разные давления воздуха p_1 и p_2 , Па, что показано на рисунке 1.

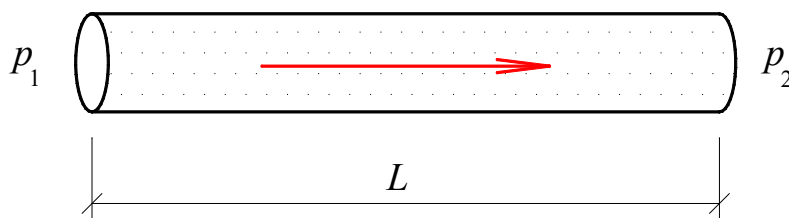


Рисунок 1 – Фильтрационное течение воздуха
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Air filtration flow
Source: completed by author.

Принимаем изотермическую фильтрацию воздуха при постоянной температуре T , К. Величины давлений воздуха близки к атмосферному давлению, поровый воздух считаем идеальным газом. Тогда по Д.И. Менделееву плотность воздуха, кг/м³:

$$\rho = p / (R_a \cdot T). \quad (1)$$

Здесь R_a – газовая константа для воздуха, Дж/(кг·К).

Расход воздуха по массе в трубе принимаем как средний арифметический на входе и выходе. Поэтому средняя плотность фильтрационного потока воздуха с учётом (1) будет

$$\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2 = (p_1 + p_2) / (2 \cdot R_a \cdot T). \quad (2)$$

По закону А. Дарси для газа скорость фильтрации воздуха в образце пористого грунта или материала в трубе, м/с:

$$V_a = k_a \cdot (p_1 - p_2) / (\mu_a \cdot L), \quad (3)$$

где k_a – коэффициент проницаемости по воздуху, м²; μ_a – динамическая вязкость порового воздуха, Па·с; остальные обозначения оговорены выше.

Массовый расход воздуха через образец, кг/с:

$$G_a = \rho \cdot \omega \cdot V_a, \quad (4)$$

где ω – площадь живого (поперечного) сечения трубы, заполненная грунтом или строительным материалом, м².

Решая совместно уравнения (1), (2), (3) и (4), выразим расход порового воздуха по массе в виде, кг/с:

$$G_a = k_a \cdot \omega \cdot (p_1^2 - p_2^2) / (2 \cdot \mu_a \cdot R_a \cdot T \cdot L). \quad (5)$$

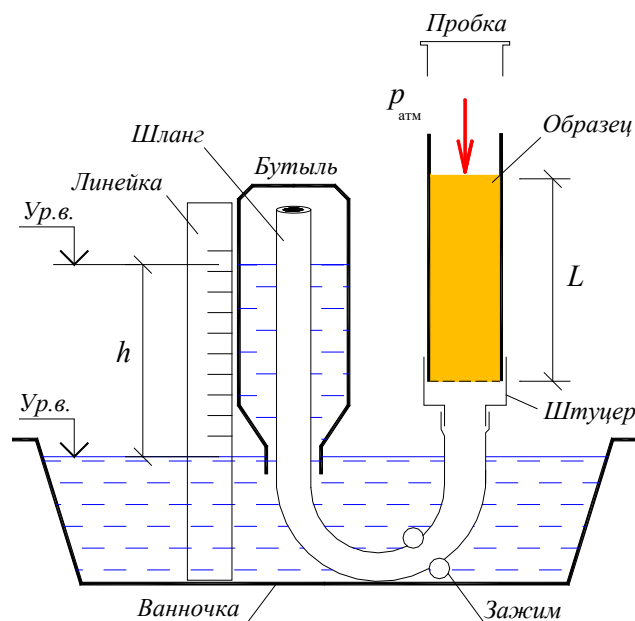


Рисунок 2 – Измерение проницаемости по воздуху
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Air permeability measurement
Source: completed by author.

На основании совместного закона Р. Бойля и Э. Мариотта о постоянстве произведения давления идеального газа на его объём в изотермических условиях выразим из формулы (5) приведённый к атмосферному давлению $p_{\text{атм}}$ объёмный расход порового воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q_a = k_a \cdot \omega \cdot (p_1^2 - p_2^2) / (2 \cdot \mu_a \cdot p_{\text{атм}} \cdot L). \quad (6)$$

Если через образец проницаемого грунта или материала в трубе (см. рисунок 1) происходит напорная фильтрация воды с напорами слева и справа соответственно H_1 , м, и H_2 , м, то по закону А. Дарси для поровой воды объёмный расход будет, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q_w = k \cdot \omega \cdot (H_1 - H_2) / L, \quad (7)$$

где k – коэффициент фильтрации в СИ, $\text{м}/\text{с}$, который в гидрогеологии обычно имеет размерность $\text{м}/\text{сут}$, переводной коэффициент в $\text{м}/\text{с}$ равен $1/86400$.

Сопоставляя формулы (6) и (7), можно убедиться в наличии аналогии фильтрации воздуха и воды, что используем в дальнейшем для обоснования способов измерения проницаемости грунтов и материалов по воде и по воз-

духу. Отметим также, что в геологии нефти и газа также рассматривают так называемые фазовые проницаемости по жидкости и по газу¹.

Рассмотрим предложенный нами способ определения воздухопроницаемости грунтов и материалов с помощью простого, но довольно надёжного лабораторного прибора, показанного на рисунке 2. Прибор был впервые сконструирован нами и испытан на многочисленных лабораторных опытах в лаборатории гидравлики в СибАДИ. Относительная погрешность прибора не превышала 1%.

Идея прибора, изображённого на рисунке 2, состоит в том, чтобы высотой водяного столба h , м, в бутылке создать перепад всасывающего давления за счёт вакуума. Этот перепад давлений между атмосферным давлением и давлением внутри бутылки, меньшим атмосферного, будет вызывать фильтрацию наружного воздуха в бутылку.

Наблюдая с интервальным секундомером за снижением вакуума по убыли величины h , м вод. ст., можно записать и обработать полученные экспериментальные данные, а затем рассчитать воздухопроницаемость грунта или строительного материала, чей образец помещён в испытательную трубку.

¹ Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах: монография. М.: Недра, 1984. 211 с.

Стеклянная бутылочная ёмкость (см. рисунок 2) на боковой стенке имеет градуировку по объёмам, см³. Это позволяет засекать объём входящего в бутылку порового воздуха, который поступает снаружи под влиянием разности давлений между атмосферным давлением и давлением внутри бутылки. Этот поровый воздух проходит через образец грунта или строительного материала, помещённого в испытательную трубку.

Попутно измеряем температуру воздуха в лаборатории и температуру воды в ванночке. Необходимо, чтобы эти температуры воды и воздуха были равны. Это обеспечивает повышение точности экспериментальных замеров и уменьшает погрешность прибора при определении воздухопроницаемости образца грунта или строительного материала.

Внешний диаметр эластичного армированного резинового шланга, соединяющего трубку с образцом и бутылку, был подобран меньшего размера, чем внутренний диаметр горловины бутылки (см. рисунок 2). Это обеспечило зазор между горловиной и шлангом, через который вода могла свободно стечь из бутылки в ванночку. Однако стеканию воды препятствовал вакуум во внутренней полости бутылки. В процессе опыта по определению воздухопроницаемости образца высота водяного столба h , м, в бутылке уменьшается постепенно, по мере прохождения фильтрации порового воздуха через образец в бутылку.

Трубка из стекла заполняется материалом образца (см. рисунок 2). В нижней части трубки имеется мелкая сетка, препятствующая выпадению образца под действием силы тяжести. Сверху на трубке имеется герметичная эластичная пробка, надетая на трубку до начала опыта. Снизу к трубке присоединён штуцер с уплотнением герметиком. К штуцеру присоединён эластичный резиновый шланг, снабжённый зажимом.

Первоначальная подготовка опыта по определению воздухопроницаемости образца такая. Вначале бутылку и шланг без воды, шланг заведён в бутылку. Затем бутылку переворачиваем и погружаем её горловину под уровень воды (Ур.в) примерно на глубину 1 см. Первоначально уровни воды в ванночке и бутылки совпадают по закону сообщающихся сосудов.

Далее присоединяем к шлангу ручной поршневой насос (большой шприц) и аккуратно откачиваем воздух из внутренней полости бутылки примерно до высоты $h = 0,15$ м. В ре-

зультате внутри бутылки образуется столб воды с начальной высотой $h = h_0 = 0,15$ м. Это и есть вакуум, выраженный в м вод. ст. В единицах СИ данный вакуум будет около 1500 Па.

Сразу же плотно с перегибом перекрываем зажимом шланг. Столб воды в бутылке перед началом опыта $h = 0,15$ м. Свободный конец шланга подсоединяем к штуцеру трубки с образцом (см. рисунок 2), которая со стороны входа атмосферного воздуха герметично закрыта пробкой. Аккуратно подвешиваем перечисленные компоненты на штатив, соблюдая их вертикальность вместе с измерительной линейкой. На заднем плане устанавливаем секундомер. Желательно также производить во время опыта видеосъёмку. В результате прибор по определению воздухопроницаемости образца полностью готов к проведению опыта.

Для обработки экспериментальных данных подготовим методологическую базу. Старт опыта производится открыванием зажима и пробки в одно и то же время. Начальное значение времени фильтрации воздуха через образец $t = 0$ с. Опираясь на закон (3), сформируем дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации воздуха через образец в виде

$$k_a \cdot \omega_0 \cdot \gamma_w \cdot h / (\mu_a \cdot L) = \omega_0 \cdot dh/dt. \quad (8)$$

Здесь ω_0 – площадь живого сечения образца, м²; ω_0 – площадь живого сечения внутренней полости бутылки, м²; g_w – удельный вес воды, Н/м³; L – длина пути фильтрации (длина образца), м; k_a – коэффициент воздухопроницаемости образца, м²; m_a – динамическая вязкость порового воздуха, Па·с; остальные обозначения оговорены выше.

Решая дифференциальное уравнение (8) нестационарной фильтрации воздуха через образец при краевых условиях, показанных на рисунке 2, получим формулу, позволяющую обработать результаты лабораторного эксперимента и рассчитать искомый коэффициент воздухопроницаемости грунта или строительного материала, м²:

$$k_a = \mu_a \cdot \omega_0 \cdot L \cdot \ln(h_0/h) / (\omega_0 \cdot \gamma_w \cdot t). \quad (9)$$

Полученная зависимость (9) напоминает формулу Г.Н. Каменского, используемую в гидрогеологии² для вычисления коэффициента фильтрации (по воде) с помощью так называемой «трубки Каменского».

² Коротеев А.П. Спутник гидрогеолога. М.: ОНТИ, 1934. 316 с.

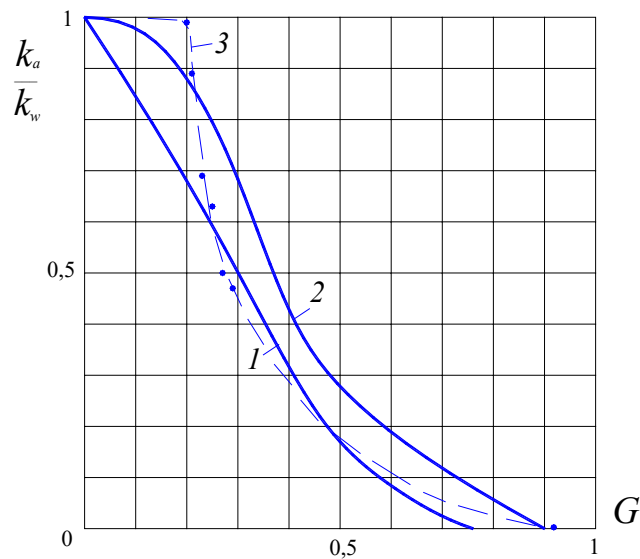


Рисунок 3 – Воздушная фазовая проницаемость: 1 – глины и суглинков³; 2 – супесей⁴; 3 – песка
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Air phase permeability: 1 – clays and loams³; 2 – sandy loams⁴; 3 – sand
Source: completed by author.

Однако для определения воздухопроницаемости формулу Г.Н. Каменского применять нельзя вследствие принципиальных отличий фильтрации воды и воздуха. Рекомендуем использовать формулу (9).

На рисунке 3 для сравнения и примера даны три графика для разных грунтов, где k_w – проницаемость по воде, м²; G – степень влажности грунта или материала. График 3 показывает результаты наших многочисленных лабораторных опытов с разработанным прибором (см. рисунок 2) по определению воздухопроницаемости речного песка. Полученные опытным путём значения воздухопроницаемости песка были проверены независимым способом. Для этого вначале для песка на приборе А. Дарси был определён коэффициент фильтрации по воде. Затем он был пересчитан к коэффициенту воздухопроницаемости. Отличие значений получилось менее 1%, что свидетельствует о надёжности прибора для определения воздухопроницаемости грунта или строительного материала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим полученные результаты по методологии и практическому определению

воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве, сопоставляя с обзором последних публикаций, близких к теме исследования.

В статье [1] исследователи из Китая разработали и представили новую систему испытания на проницаемость под высоким давлением для подземных резервуаров хранения сжатого воздуха.

В работе [2] авторы из Японии и Германии изучили проницаемость недеформированных, деформированных и/или изменённых гранитов, а также искусственной пористой керамики. Проницаемость была протестирована с помощью газозондовых пермеаметров (стационарный поток газа и переходный импульс давления).

Китайские ученые в статье [3] на основе самостоятельно разработанной экспериментальной системы изучения геофильтрации исследовали поведение потока в трещинах с различной проницаемостью, где закон Дарси нарушается. Результаты показывают, что как вязкая, так и инерционная составляющие проницаемости демонстрируют положительную корреляцию с проницаемостью трещины.

³ Прогнозы подтопления и расчёт дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях / ВНИИ ВОДГЕО. М.: Стройиздат, 1991. 272 с.

⁴ Кристеа Н. Подземная гидравлика: монография. Т. II. М.: Гостехиздат, 1962. 492 с.

Исследователи из США [4] заявили о новом подходе к оценке проницаемости и пластового давления в течение периода после закрытия испытаний на закачку/отток, в то время как существующие методы в основном сосредоточены на диагностических испытаниях на закачку в трещину для оценки параметров геологического пласта. При этом не было разработано никаких методов для анализа периода закрытия после испытаний на закачку/отток в скважинах.

В статье [5] представлен метод определения слоистой структуры и профиля проницаемости стали с помощью импульсного вихретокового контроля, который обеспечивает лучшую проникающую способность.

Российские учёные из Сколково [6] представили новый метод оценки пространственного распределения абсолютной проницаемости в нефтяных пластах, согласующийся с измерениями каротажа скважин и испытания скважин. Основная цель – создать карту проницаемости, включив результаты интерпретации испытаний скважин и достигнув гидродинамического подобия фактическому распределению проницаемости вокруг каждой скважины. Это усовершенствование направлено на повышение точности результатов моделирования пласта при воспроизведении реальных данных.

В статье [7] авторами из Норвегии и Японии изучены подводные оползни, вызванные сейсмической активностью, представляющие значительную опасность для морских сооружений. Чтобы улучшить понимание этого явления, была разработана CFD-схема, способная моделировать механизмы, лежащие в основе подводных оползней, вызванных землетрясением. Недавние испытания на центрифуге продемонстрировали, что проницаемость морских осадков является критическим фактором в определении механизма разрушения подводных оползней. В частности, более низкая проницаемость увеличивает вероятность перехода склона от обрушения к гравитационному потоку обломков.

Исследователи из Китая и Германии [8] предложили трехмерную (3D) эталонную модель лабораторного эксперимента для изучения процесса динамического гидравлического разрыва пласта в условиях напряженного состояния. Результаты показывают, что распространение трещины связано с диффузией жидкости при высоком давлении закачки при разрушении. Фронт трещины опережает фронт давления жидкости. При низком давлении закачки после разрушения фронт давления жидкости постепенно достигает фронта

трещины, и диффузия жидкости является основным движущим фактором распространения по трещине.

В статье [9] авторов из Южной Кореи описывается комплексное исследование для точного определения гидравлической проницаемости и удельного объема образца сланца.

Авторы из Бразилии и Норвегии [10] представили материалы по испытанию проницаемости мягкой глины *in situ* (в поле) с зондом на испытательном полигоне. Приведено описание метода испытания проницаемости, обсуждаются его преимущества и недостатки, особенно в случае очень мягких глин при низких напряжениях. Поровое давление контролировалось во время установки зонда и оказалось немного ниже порового давления соответствующего положению фильтра зонда.

В исследовании китайских ученых [11] изучается нелинейное поведение потока, проходящего через трещины в бетоне при различных градиентах давления с использованием теста на водопроницаемость. Искусственные трещины были созданы и количественно оценены методом сопоставления облаков точек. Результаты показывают, что закон Дарси становится не применимым для расчета кажущейся проницаемости треснувшего бетона при высоком числе Рейнольдса. В качестве альтернативы предлагается использовать параболическое уравнение Форхгеймера для моделирования скоростей потока при различных градиентах давления.

Исследователи из Китая [12] пришли к выводу, что интенсивность осадков и проницаемость почвы склона влияют на инфильтрацию осадков и, следовательно, играют важную роль в определении режима разрушения оползней, вызванных дождями.

Ученые из Индии [13] дали новый подход к одновременному учету ключевых параметров резервуара, таких как горизонтальная проницаемость, вертикальная проницаемость, скин-фактор и граничные расстояния для пространственного распределения по ячейкам сетки в трехмерной модели резервуара с одной скважиной.

Авторы из Китая [14] пришли к выводу, что испытания на водопроницаемость являются одними из наиболее широко используемых методов для оценки ширины трещин и самовосстанавливающихся характеристик бетона. В попытке преодолеть ограничение, вызванное вязкостью воды, был предложен тест на диффузию газа, в котором газ с низкой вязкостью используется для замены воды в качестве среды. Однако, учитывая, что вода и газы ведут себя по-разному при прохождении через

трещины, эти два метода могут иметь разные характеристики при оценке ширины трещины и характеристик восстановления бетона. В исследовании были проанализированы тенденции, обнаруженные при оценке ширины трещины этими двумя методами.

В исследовании [15] авторов из Китая были проведены подземные полевые испытания закачки азота в шахте с угольными пластами с низкой проницаемостью, а также был выполнен сравнительный анализ техники инъекции азота для улучшения дегазации и дренажа.

Китайские авторы в статье [16] утверждают, что цементированный песчано-гравийный материал (ПГМ) является экологически чистым материалом для строительства плотин. Его проницаемость под нагрузкой имеет решающее значение для инженерных приложений. В этом исследовании изучается проницаемость ПГМ при осевом сжатии с помощью лабораторных экспериментов.

Авторы из США в работе [17] изучали эволюцию газопроницаемости и трещин высыхания в уплотненных бентонитовых блоках, армированных стекловолокном при 150 °С.

Исследователи из США, Японии и Египта в статье [18] резюмировали, что проницаемость и пористость являются критическими параметрами, которые влияют на оценку и управление углеводородными пластами. Традиционные методы оценки проницаемости и пористости ограничены дефицитом данных и геологической изменчивостью, что требует использования передовых прогностических моделей. В этом исследовании представлена полностью автоматизированная структура машинного обучения (AML), которая объединяет четыре передовые модели – Gradient Boosting Machine (GBM), Distributed Random Forest (DRF), Generalized Linear Model (GLM) и Deep Neural Network (DNN) – для прогнозирования проницаемости и пористости на основе данных каротажа скважин.

Авторы из Китая [19] подчеркивают, что хранение энергии с помощью сжатого воздуха в водоносных горизонтах (CAESA) является новой крупномасштабной технологией. Однако влияние проницаемости на подземные процессы и производительность устья скважины требуют дальнейшего изучения. В этом исследовании разработана сопряженная модель ствола скважины и водоносного горизонта на основе практического теста CAESA в окрестностях Дэчжоу Китая в плоских водоносных горизонтах.

В работе [20] китайских исследователей сообщено, что во время проходки щита с компенсацией давления грунта в насыщенном

водой песчаном грунте для предотвращения выброса воды впрыскиваются пена и другие реагенты, например, такие как бентонитовая суспензия. Испытания на проницаемость проводились для изучения того, как давление воды влияет на проницаемость песка, кондиционированного пеной и бентонитовой суспензией. Экспериментальные результаты показывают, что увеличение давления воды в верхней и нижней части образца продлевает начальный стабильный период коэффициента проницаемости, значительно замедляя скорость его роста.

Нетрудно заметить из приведенного обзора последних публикаций, что исследование проницаемости грунтов и материалов вызывает большой научный интерес. Однако применительно к интересующим нас вопросам, связанным с защитой от подтопления в городском строительстве, данные публикации имеют лишь косвенное отношение, возможно, за исключением статьи [14]. Тем не менее в работах затронуты интересные особенности определения проницаемости грунтов и материалов. Поэтому наша тема исследования весьма актуальна, разработанная методология и способ определения воздухопроницаемости грунтов и материалов рекомендуется к практическому применению при борьбе с подтоплением в городском строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в представленной работе обоснована аналогия движения подземных вод и воздуха. Основное внимание уделено фильтрации воздуха в грунте или строительном материале. Предложен, теоретически обоснован и практически опробован способ определения воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве. Предпринятая тема исследования весьма актуальна, разработанная методология и способ определения воздухопроницаемости грунтов и материалов рекомендуется к практическому применению при борьбе с подтоплением в городском строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shikang Qin, Shuwei Zhou, Caichu Xia, Chen Xu, Rui Liu A new testing system to the permeability coefficient of flexible sealing materials for compressed air energy storage caverns and its application // *Journal of Energy Storage*. V. 122. 2025. P. 116717. DOI: 10.1016/j.est.2025.116717
2. Scibek J., Kubo T., Koike K., Achtziger-Zupančič P. Permeability of granitic drill core tested by steady flow and transient flow gas permeameter

probes: Improvements to methods and applications // *Engineering Geology*. V. 351. 2025. P. 108023. DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.108023

3. Xiang L., Li C., Meng J. Effect of matrix permeability on non-Darcian flow behavior and flow partitioning patterns in fractured porous media: Insight from experimental and numerical tests // *Journal of Hydrology*. V. 658. 2025. P. 133234. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133234

4. Eltaleb Ibrahim, Soliman Mohamed Y., Farouq Ali S.M., Cipolla Craig Estimation of permeability from pump-in/flowback tests: An after-closure analysis approach // *Fuel*. V. 381, Part B, 2025. P. 133020. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133020

5. Zheng Xinnan, She Saibo, Xia Zihan, Xiong, Xun Zou, Kuohai Yu, Rui Guo, Ruoxuan Zhu, Zili Zhang, Wuliang Yin Analyzing the permeability distribution of multilayered specimens using pulsed eddy-current testing with multi-scale 1D-ResNet // *NDT & E International*. V. 149. 2025. P. 103247. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103247

6. Kanin E., Garipova A., Boronin S., Vanovskiy V., Vainshtein A., Afanasyev A., Osiptsov A., Burnaev E. Combined mechanistic and machine learning method for construction of oil reservoir permeability map consistent with well test measurements // *Petroleum Research*. Available online, 12 September 2024. P. 1-19. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.09.001

7. Tran Quoc-Anh, Sørli Erik, Grimstad Gustav, Eiksund Gudmund, Takahashi Hidenori, Sassa Shinji Influence of sediment permeability in seismic-induced submarine landslide mechanism: CFD-MPM validation with centrifuge tests and analysis // *Computers and Geotechnics*. V. 174. 2024. P. 106588. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106588

8. Shen Haimeng, Yoon Jeoung S., Zang Arno, Hofmann Hannes, Li Xiaying, Li Qi Impact of injection pressure and polyaxial stress on hydraulic fracture propagation and permeability evolution in graywacke: Insights from discrete element models of a laboratory test // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 17. Issue 4. 2025. P. 2344-2359. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.05.017

9. Song I., Seo E. Integrating transient pressure and flow data for determination of hydraulic permeability and specific storage of a shale sample: Experimental tests and sensitivity analysis // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. V. 176. 2024. P. 105718. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105718

10. Vargas J.W.S., Danziger F.A.B., Lopes F.R., Lunne T. Inflow and outflow permeability tests in a very soft clay under low stresses // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 16. Issue 8. 2024. P. 3270-3283. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.11.009

11. Hou Sailong, Li Kai, Hu Xiang, Shi Caijun Exploring the nonlinear behavior of flow through cracked concrete by water permeability test // *Cement and Concrete Composites*. V. 150. 2024. P. 105557. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105557

12. Qu L., Du Q., Hui J. Model Test Study of the Influence of Rainfall Intensity and Soil Permeability on Slope Instability // *KSCE Journal of Civil Engineering*. V. 28. Issue 7. 2024. P. 2722-2737. DOI: 10.1007/s12205-024-1550-1

13. Kumar A., Liang L., Ojha K. Simultaneous inversion of permeability, skin and boundary from pressure transient test data in three-dimensional single well reservoir model // *Petroleum Research*. V. 9. Issue 2. 2024. P. 265-272. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.01.004

14. Lee D., Shin K., Lee K. Evaluation of crack width and self-healing performance of concrete based on fluid flow characteristics: Comparison between water permeability test and gas diffusion test // *Construction and Building Materials*. V. 411. 2024. P. 134118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134118

15. Wang Kai, Gong Haoran, Wang Gongda, Yang Xin, Xue Haiteng, Du Feng, Wang Zhie N2 injection to enhance gas drainage in low-permeability coal seam: A field test and the application of deep learning algorithms // *Energy*. V. 290. 2024. P. 130010. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130010

16. Han Liwei, Guo Ruibin, Zhang Yifan, Li Jiayu, Yao Xinyuan Cementitious sand gravel material: Influence of axial compressive load on permeability performance // *Case Studies in Construction Materials*. V. 22. 2025. P. e04643. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04643

17. Dong-Hwa Noh, Seunghee Kim, Jongwan Eun, Yong-Rak Kim Experimental study on gas permeability and desiccation cracking of fiber-reinforced compacted bentonite at high temperature // *Construction and Building Materials*. V. 478. 2025. P.141053. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141053

18. Amer A. Shehata, Mohamed Ahmed, Ahmed A. Kassem, Ramadan Abdelrehim, Takeshi Tsuji, Amir Ismail Optimizing permeability and porosity prediction with advanced machine learning: A case study unlocking the complexities of late cretaceous reservoirs, gulf of suez, Egypt // *Journal of African Earth Sciences*. V. 228. 2025. P. 105670. DOI: 10.1016/j.jafrsci.2025.105670

19. Yi Li, Ping Xue, Yi Li, Yaning Liu, Jingrui Wang, Wenjie Yin Modeling underground performance of compressed air energy storage in a practical flat aquifer: Insights on the permeability effects // *Energy*. V. 322. 2025. P. 135592. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135592

20. Shuying Wang, Fanlin Ling, Qinxin Hu, Tongming Qu, Junlong Shang Effect of water pressure on time-dependent permeability characteristics of sand conditioned with foam and bentonite slurry // *Canadian Geotechnical Journal*. V. 62. 2025. P. 101. DOI: 10.1139/cgj-2023-0497

REFERENCES

1. Shikang Qin, Shuwei Zhou, Caichu Xia, Chen Xu, Rui Liu A new testing system to the permeability coefficient of flexible sealing materials for compressed air energy storage caverns and its application. *Journal of Energy Storage*. V. 122. 2025; P. 116717. DOI: 10.1016/j.est.2025.116717

2. Scibek J., Kubo T., Koike K., Achtziger-Zupančič P. Permeability of granitic drill core tested by steady flow and transient flow gas permeameter probes: Improvements to methods and applications. *Engineering Geology*. V. 351. 2025; P. 108023. DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.108023

3. Xiang L., Li C., Meng J. Effect of matrix permeability on non-Darcian flow behavior and flow partitioning patterns in fractured porous media: Insight

from experimental and numerical tests. *Journal of Hydrology*. V. 658. 2025; P. 133234. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133234

4. Eltaleb Ibrahim, Soliman Mohamed Y., Farouq Ali S.M., Cipolla Craig Estimation of permeability from pump-in/flowback tests: An after-closure analysis approach. *Fuel*. V. 381, Part B, 2025; P. 133020. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133020

5. Zheng Xinnan, She Saibo, Xia Zihan, Xiong Lei, Zou Xun, Yu Kuohai, Guo Rui, Zhu Ruoxuan, Zhang Zili, Yin Wuliang. Analyzing the permeability distribution of multilayered specimens using pulsed eddy-current testing with multi-scale 1D-ResNet. *NDT & E International*. V. 149. 2025; P. 103247. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103247

6. Kanin E., Garipova A., Boronin S., Vanovskiy V., Vainshtein A., Afanasyev A., Osipov A., Burnaev E. Combined mechanistic and machine learning method for construction of oil reservoir permeability map consistent with well test measurements. *Petroleum Research. Available online*, 12 September 2024; P. 1-19. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.09.001

7. Tran Quoc-Anh, Sørli Erik, Grimstad Gustav, Eiksund Gudmund, Takahashi Hidenori, Sassa Shinji Influence of sediment permeability in seismic-induced submarine landslide mechanism: CFD-MPM validation with centrifuge tests and analysis. *Computers and Geotechnics*. V. 174. 2024; P. 106588. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106588

8. Shen Haimeng, Yoon Jeoung S., Zang Arno, Hofmann Hannes, Li Xiaying, Li Qi Impact of injection pressure and polyaxial stress on hydraulic fracture propagation and permeability evolution in graywacke: Insights from discrete element models of a laboratory test. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 17. Issue 4. 2025; P. 2344-2359. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.05.017

9. Song I., Seo E. Integrating transient pressure and flow data for determination of hydraulic permeability and specific storage of a shale sample: Experimental tests and sensitivity analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. V. 176. 2024. P. 105718. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105718

10. Vargas J.W.S., Danziger F.A.B., Lopes F.R., Lunne T. Inflow and outflow permeability tests in a very soft clay under low stresses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 16. Issue 8. 2024; P. 3270-3283. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.11.009

11. Hou Sailong, Li Kai, Hu Xiang, Shi Caijun Exploring the nonlinear behavior of flow through cracked concrete by water permeability test. *Cement and Concrete Composites*. V. 150. 2024; P. 105557. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105557

12. Qu L., Du Q., Hui J. Model Test Study of the Influence of Rainfall Intensity and Soil Permeability on Slope Instability. *KSCE Journal of Civil Engineering*. V. 28. Issue 7. 2024; P. 2722-2737. DOI: 10.1007/s12205-024-1550-1

13. Kumar A., Liang L., Ojha K. Simultaneous inversion of permeability, skin and boundary from pressure transient test data in three-dimensional single well reservoir model. *Petroleum Research*. V. 9. Issue 2. 2024; P. 265-272. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.01.004

14. Lee D., Shin K, Lee K. Evaluation of crack width and self-healing performance of concrete based on fluid flow characteristics: Comparison between water permeability test and gas diffusion test. *Construction and Building Materials*. V. 411. 2024; P. 134118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134118

15. Wang Kai, Gong Haoran, Wang Gongda, Yang Xin, Xue Haiteng, Du Feng, Wang Zhie N2 injection to enhance gas drainage in low-permeability coal seam: A field test and the application of deep learning algorithms. *Energy*. V. 290. 2024; P. 130010. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130010

16. Han Liwei, Guo Ruibin, Zhang Yifan, Li Jiayu, Yao Xinyuan Cementitious sand gravel material: Influence of axial compressive load on permeability performance. *Case Studies in Construction Materials*. V. 22. 2025; P. e04643. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04643

17. Noh Dong-Hwa, Kim Seunghee, Eun Jongwan, Kim Yong-Rak Experimental study on gas permeability and desiccation cracking of fiber-reinforced compacted bentonite at high temperature. *Construction and Building Materials*. V. 478. 2025; P.141053. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141053

18. Amer A. Shehata, Mohamed Ahmed, Ahmed A. Kassem, Ramadan Abdelrehim, Takeshi Tsuji, Amir Ismail Optimizing permeability and porosity prediction with advanced machine learning: A case study unlocking the complexities of late cretaceous reservoirs, gulf of suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*. V. 228. 2025; P. 105670. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2025.105670

19. Li Yi, Xue Ping, Li Yi, Liu Yanning, Wang Jingrui, Yin Wenjie Modeling underground performance of compressed air energy storage in a practical flat aquifer: Insights on the permeability effects. *Energy*. V. 322. 2025; P. 135592. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135592

20. Wang Shuying, Ling Fanlin, Hu Qinxin, Qu Tongming, Shang Junlong Effect of water pressure on time-dependent permeability characteristics of sand conditioned with foam and bentonite slurry. *Canadian Geotechnical Journal*. V. 62. 2025; P. 101. DOI: 10.1139/cgj-2023-0497

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сологеев Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф. ВАК РФ, проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), (644050, г. Омск, пр. Мира 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2553-9892>,

SPIN-код: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sologaev Valery Ivanovich – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation, Professor of Civil Engineering Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2553-9892>,

SPIN-code: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org