

Научная статья
УДК 69.034.96
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-822-831>
EDN: HWXRZV



РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПЕРЕДВИЖНЫХ УЧАСТКОВ СТРОИТЕЛЬНОГО ВОДООТЛИВА И ВОДОПОНИЖЕНИЯ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ, ТОННЕЛЕЙ И МЕТРОПОЛИТЕНОВ

В.И. Сологаев

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

sologaev_vi@cdo.sibadi.org

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство подземных объектов в виде трубопроводов, тоннелей и метрополитенов в слабопроницаемых водонасыщенных грунтах, обладающих подвижностью, трудоёмко, дорогостояще и опасно. Системы строительного водопонижения удаляют значительную часть воды из таких грунтов, превращая их в устойчивые породы, пригодные для эффективного проведения земляных работ. Разработка систем передвижных участков водоотлива и строительного водопонижения для трубопроводов, тоннелей и метрополитенов может быть произведена с использованием методологии теории фильтрации воды и воздуха в городском строительстве, метода компьютерного моделирования фильтрации флюидов и производства работ с помощью электронных таблиц, с привлечением новых технологий искусственного интеллекта и обучения машин.

Методы и материалы. Рабочей гипотезой статьи является идея создания комплексного подхода для эффективного решения проблемы подтопления подземными водами в период строительства линейных строительных объектов, подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов в слабопроницаемых водонасыщенных грунтах. Методы теории фильтрации, применённые в работе, подразделяются на аналитические и численные. Аналитическим операторным методом решены задачи нестационарной фильтрации подземных вод к системам строительного водопонижения. Моделирование с помощью электронных таблиц относится к нескольким процессам рассматриваемого строительного производства. Методом конечных разностей в электронных таблицах решаются фильтрационные модели водопонижительных систем, которые не поддаются аналитическому решению. Кроме того, новой особенностью является применение электронных таблиц для моделирования организации и технологии строительного водоотлива и водопонижения. Рассмотрена возможность применения самообучающихся рекурсивных компьютерных программ.

Обсуждение. Обзор отечественных и зарубежных авторов показал, что прямых публикаций по теме статьи нет. Имеются лишь отдельные вопросы, близкие к тематике представленной работы, связанные со строительством подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов. При этом проанализированы особенности осушения слабопроницаемых водонасыщенных грунтов, обладающих подвижностью. Предложены к рассмотрению в качестве примера мобильные передвижные участки систем строительного водоотлива и водопонижения, скорость монтажа и демонтажа которых соизмерима со скоростью передвижения разработки траншеи при открытом способе работ или проходческого щита при закрытом способе работ, например, для перегонного тоннеля метрополитена.

Заключение. Таким образом, разработку систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов предложено производить новым комплексным подходом с использованием методологии теории фильтрации воды и воздуха в городском строительстве, методов компьютерного моделирования фильтрации флюидов и производства работ с помощью электронных таблиц, с привлечением новых технологий искусственного интеллекта и обучения машин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, водоотлив, водопонижение, трубопроводы, тоннели, метрополитены, теория фильтрации, самообучающиеся программы

Статья поступила в редакцию 14.05.2025; одобрена после рецензирования 18.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

© Сологаев В.И., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Сологаев В.И. Разработка систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для трубопроводов, тоннелей и метрополитенов // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 822-831. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-822-831>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-822-831>

EDN: HWRZV

DEVELOPMENT OF MOBILE SYSTEMS FOR CONSTRUCTION DRAINAGE AND DEWATERING FOR PIPELINES, TUNNELS AND METROPOLITANS

Valery I. Sologaev

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

ABSTRACT

Introduction. Construction of underground facilities such as pipelines, tunnels and subways in low-permeable water-saturated mobile soils is labor-intensive, expensive and dangerous. Construction dewatering systems remove a significant portion of water from such soils, turning them into stable rocks suitable for efficient excavation works. The development of mobile drainage and construction dewatering systems for pipelines, tunnels and subways can be carried out using the methodology of water and air filtration theory in urban construction, the method of computer modeling of fluid filtration and operations based on using spreadsheets, with the involvement of new artificial intelligence technologies and machine learning.

Methods and materials. The working hypothesis of the research is the idea of creating a comprehensive approach to effectively solve the problem of groundwater flooding during the construction of linear projects, underground pipelines, tunnels and subways in low-permeable water-saturated soils. The methods of filtration theory used in the work are divided into analytical and numerical. The analytical operator method is used to solve the problems of non-stationary filtration of groundwater in construction dewatering systems. Modeling with spreadsheets applies to several processes of construction operations arrangement. The finite difference method in spreadsheets is used to solve filtration models of dewatering systems that cannot be solved analytically. In addition, a new feature is the use of spreadsheets to model organization and technology of construction drainage and dewatering. The possibility of using self-learning recursive computer programs is considered.

Discussion. A review of domestic and foreign studies has shown that there are no publications related to the topic of the article. Certain issues relevant to this paper and referred in particular to the construction of underground pipelines, tunnels and subways have been studied. At the same time, the features of drainage of low-permeable water-saturated mobile soils are analyzed. Mobile sections of construction drainage and dewatering systems are proposed for consideration as an example, their installation and dismantling time being comparable with that of building the trench during open cut construction or the shield speed during tunneling, for example, a subway.

Conclusion. Thus, it is proposed to develop systems for mobile sections of construction drainage and dewatering for underground pipelines, tunnels and subways based on the new integrated approach with the use of the methodology of the theory of water and air filtration in urban construction, methods of computer modeling of fluid filtration and construction operations based on spreadsheets, as well as new technologies of artificial intelligence and machine learning.

KEYWORDS: construction, drainage, dewatering, pipelines, tunnels, subways, filtration theory, self-learning programs

The article was submitted: 14.05.2025; approved after reviewing: 18.09.2025; accepted for publication: 21.10. 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Sologaev V.I. Development of mobile systems for construction drainage and dewatering for pipelines, tunnels and metropolitans. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 822-831. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-822-831>

© Sologaev Valery I., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Строительство подземных объектов в виде трубопроводов, тоннелей и метрополитенов в слабопроницаемых насыщенных водой грунтах, обладающих подвижностью, трудоёмко, дорогостояще и опасно [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Сложность проведения таких работ усугубляется воздействием климата в городской среде [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Системы строительного водопонижения удаляют значительную часть воды из таких грунтов, тем самым превращая их в устойчивые породы, пригодные для эффективного проведения земляных работ. Разработка систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для трубопроводов, тоннелей и метрополитенов может быть произведена с использованием методологии теории фильтрации воды и воздуха в городском строительстве, метода компьютерного моделирования фильтрации флюидов и производства работ с помощью электронных таблиц, с привлечением новых технологий искусственного интеллекта и обучения машин [23, 24, 25].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Рабочей гипотезой статьи является идея создания комплексного подхода для эффективного решения проблемы подтопления подземными водами в период строительства линейных строительных объектов, подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов в слабопроницаемых насыщенных водой грунтах. Методы теории фильтрации, применённые в работе, подразделяются на аналитические с формулами и численные с компьютерными моделями. Аналитический операторный метод показан в виде примера нестационарной фильтрации подземных вод к системам строительного водоотлива линейных объектов строительства. Моделирование с помощью электронных таблиц относится к нескольким процессам рассматриваемого строительного производства. Методом конечных разностей в электронных таблицах можно вычислить фильтрационные модели водопонижительных систем, когда невозможно получить аналитическое решение в виде формул. Кроме того, новой особенностью является предложение о применении электронных таблиц для моделирования организации и технологии строительного водопонижения. Дополнительно рассмотрена возможность применения самообучающихся рекурсивных компьютерных программ.

Первый вопрос, который возникает перед строительством рассматриваемых линейных объектов в слабопроницаемых насыщенных водой и подвижных грунтах – можно ли обойтись без систем водопонижения? Если можно, то достаточно предусмотреть лишь водоотлив и крепление стенок котлована или траншеи. Пример водоотлива показан на рисунке 1 со стандартными сокращениями.

Рисунок 1 свидетельствует о том, что траншеи и котлованы для линейных объектов в насыщенных водой и подвижных грунтах в стеснённых условиях городского строительства имеют сложную гидрогеологическую картину движения техногенных подземных вод. На рисунке 1 представлен открытый способ проведения земляных и строительно-монтажных работ при устройстве трубопровода большого диаметра. Прилегающие к трассе трубопровода здания и сооружения могут быть подтоплены. Техногенные подземные воды с началом земляных работ приходят в движение и устремляются по грунтовой массе к строительной выработке. По пути фильтрационного движения подземных вод могут быть искусственные препятствия в виде фундаментов, свай, шпунтовых ограждений траншей и котлованов, участков пониженной проницаемости. Эти обстоятельства искажают линии тока подземных вод. Традиционные расчётные методики для систем водоотлива и водопонижения дают слишком грубые результаты о напорах и расходах подземных вод вблизи строительных выработок. Кроме того, процессы фильтрации подземных вод имеют весьма нестационарный характер. И, наконец, процессы строительства подземных выработок тоже обладают нестационарными признаками продвижения строительного участка в пространстве. Покажем, как учесть все эти особенности, постепенно продвигаясь по пунктам комплексной методологии по разработке систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для трубопроводов, тоннелей и метрополитенов.

В стеснённых условиях города стенки траншей и котлованов с неустойчивыми мокрыми грунтами стремятся снабдить прочными креплениями. Вариантами креплений могут быть стальной шпунт, металлические профили с деревянными досками-забирками и т.д. Их задача в первую очередь сводится к удерживанию массивов грунтовых толщ от обрушения. Абсолютно герметичными их не делают.

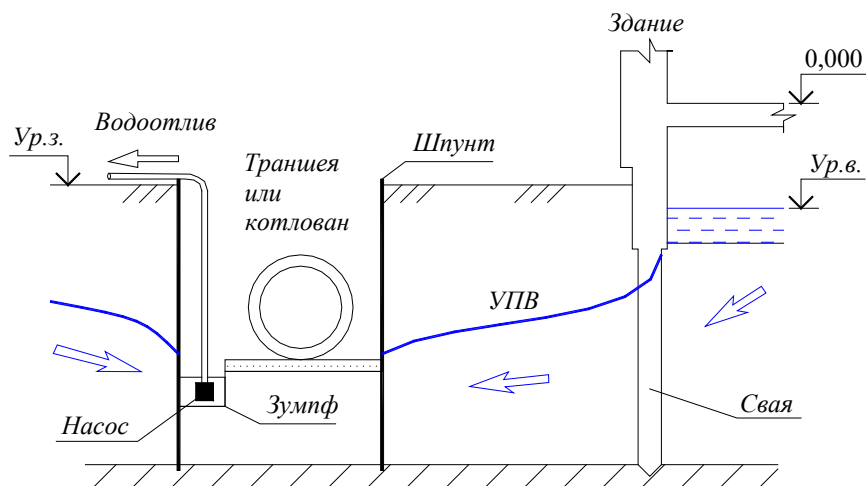


Рисунок 1 – Крепление стенок котлована или траншеи с водоотливом
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Fastening the walls of a pit or a trench with drainage
Source: completed by author.

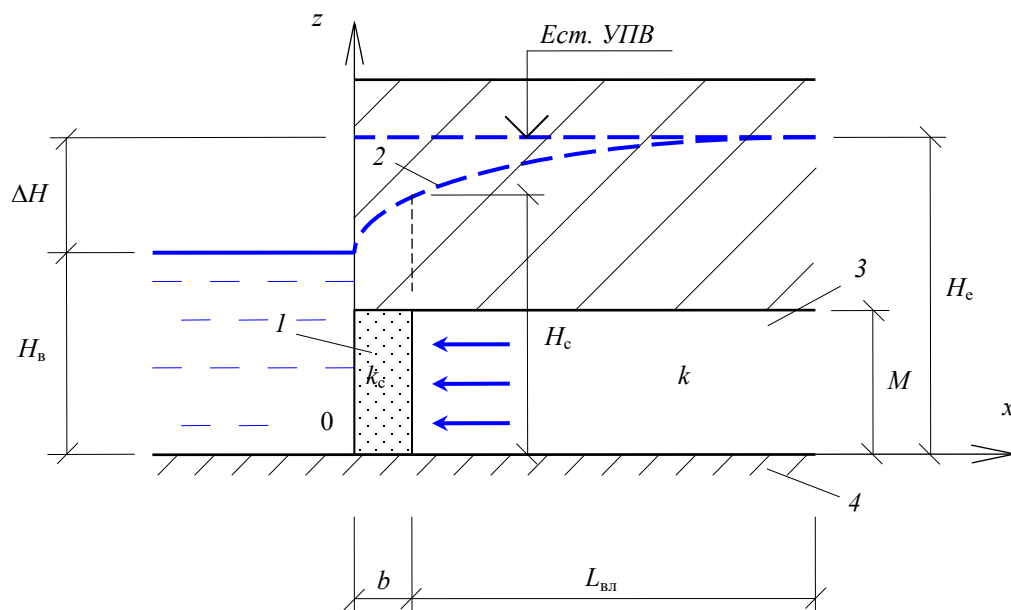


Рисунок 2 – Расчётная схема водоотлива из строительной выработки:
1 – зона пониженной проницаемости; 2 – депрессия УПВ; 3 – водоносный пласт; 4 – водоупорные породы
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Design scheme of drainage for tunnels:
1 – zone of low permeability; 2 – depression of the GWL; 3 – aquifer; 4 – impermeable rocks
Source: completed by author.

Поэтому зона грунта около строительной выработки обладает пониженной проницаемостью, соответствующей коэффициенту фильтрации k_c , м/сут. Водоносный пласт, подходящий снаружи к выработке, обладает коэффициентом фильтрации k , м/сут. Покажем эти две разные зоны грунта на рисунке 2.

На рисунке 2 показаны следующие обозначения: Ест. УПВ – уровень подземных вод в естественном состоянии до начала строительства; H_e – напор техногенных подземных вод в естественном состоянии, м; H_B – напор подземных вод в строительной выработке, м; ΔH – разность напоров, м; b – толщина зоны

крепления выработки, м; $L_{\text{вп}}$ – зона влияния водоотлива, м; остальные обозначения оговорены выше.

Применим как инструмент исследования аналитический операторный метод для решения задачи о нестационарной фильтрации подземных вод к системам водоотлива линейных объектов строительства (см. рисунок 2). Для этого составим систему из двух частных дифференциальных уравнений движения техногенных подземных вод к строительной выработке так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= \frac{1}{\eta \cdot a} \cdot \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad 0 \leq x \leq b; \quad \eta = k_c/k; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad b \leq x \leq \infty; \quad a = k \cdot M/\mu, \end{aligned} \quad (1)$$

где t – продолжительность земляных и строительно-монтажных работ в выработке, сут; H_1 – напор техногенных подземных вод в зоне крепления стенок выработки, м; H_2 – напор подземных вод в зоне влияния водоотлива, м; μ – коэффициент водоотдачи грунта; a – коэффициент пьезопроводности или уровнепроводности техногенного водоносного пласта для, соответственно, напорного или безнапорного движения подземных вод, м²/сут; M – толщина напорного водоносного пласта, м; остальные обозначения подробно оговорены к рисунку 2, где можно увидеть начальные и граничные условия задачи.

Если строительная выработка проходит в условиях безнапорных грунтовых вод, то вместо толщины M надо подставить среднюю мощность грунтовых вод h_c , м, в виде

$$h_c = (H_e + H_b)/2. \quad (2)$$

Преобразуя систему уравнений (1) операторным методом по Лапласу, получим частное решение для интегральных изображений напоров в зоне пониженной проницаемости грунта около стенок выработки при малых значениях времени t в начале земляных работ, которое выглядит так:

$$\begin{aligned} \overline{H_1} &= \frac{H_e}{p} - \frac{H_e - H_b}{p} \cdot (1 - \beta) \cdot \\ &\cdot \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{p}{\eta \cdot a}}\right); \quad \beta = \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где p – параметр Лапласа.

Применяя к формуле (3) обратное преобразование Лапласа, приходим к формуле для определения напора техногенных подземных

вод в зоне пониженной проницаемости грунта около стенок строительной выработки в виде

$$\begin{aligned} H_1 &= H_e - \Delta H \cdot (1 - \beta) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{\eta \cdot a \cdot t}}\right); \\ \beta &= \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}; \quad \eta = \frac{k_c}{k}; \quad 0 \leq x \leq b, \end{aligned} \quad (4)$$

где все обозначения уже оговорены выше.

Кроме значений фильтрационных напоров при водоотливе для правильного подбора насосов понадобится формула водопритока техногенных подземных вод на 1 м длины строительной выработки q_b , м³/(сут·м). Чтобы её получить, надо зависимость (4) умножить на дробь $k_c \cdot M/B$, где B – половина ширины строительной выработки. После этого дифференцируем по координате x . После несложных выкладок найдём формулу для определения водопритока техногенных подземных вод на 1 м длины строительной выработки в виде

$$q_b = \frac{k_c \cdot M \cdot \Delta H}{B \cdot \sqrt{\eta \cdot a \cdot t}}, \quad (5)$$

где все обозначения уже оговорены выше.

Моделирование с помощью электронных таблиц относится к нескольким процессам рассматриваемого строительного производства. Методом конечных разностей (МКР) в электронных таблицах можно вычислить фильтрационные модели водопонижительных систем, когда невозможно получить аналитическое решение в виде формул. Кроме того, новой особенностью является предложение о применении электронных таблиц для моделирования организации и технологии строительного водопонижения. Методология МКР в электронных таблицах подробно рассмотрена в монографии [26].

Рассмотрим дополнительно возможность применения самообучающихся рекурсивных компьютерных программ. Эту компьютерную методологию сейчас называют такими модными терминами как «искусственный интеллект» и «машинное обучение». Наше новое предложение по применению самообучающихся рекурсивных компьютерных программ состоит в применении для начальных проработок электронных таблиц, имеющих возможность рекурсивного выполнения повторяющихся итераций. Для начинающего исследователя в данной сфере необходимо в самом начале пошагово проследить развитие алгоритма самообучения программы.

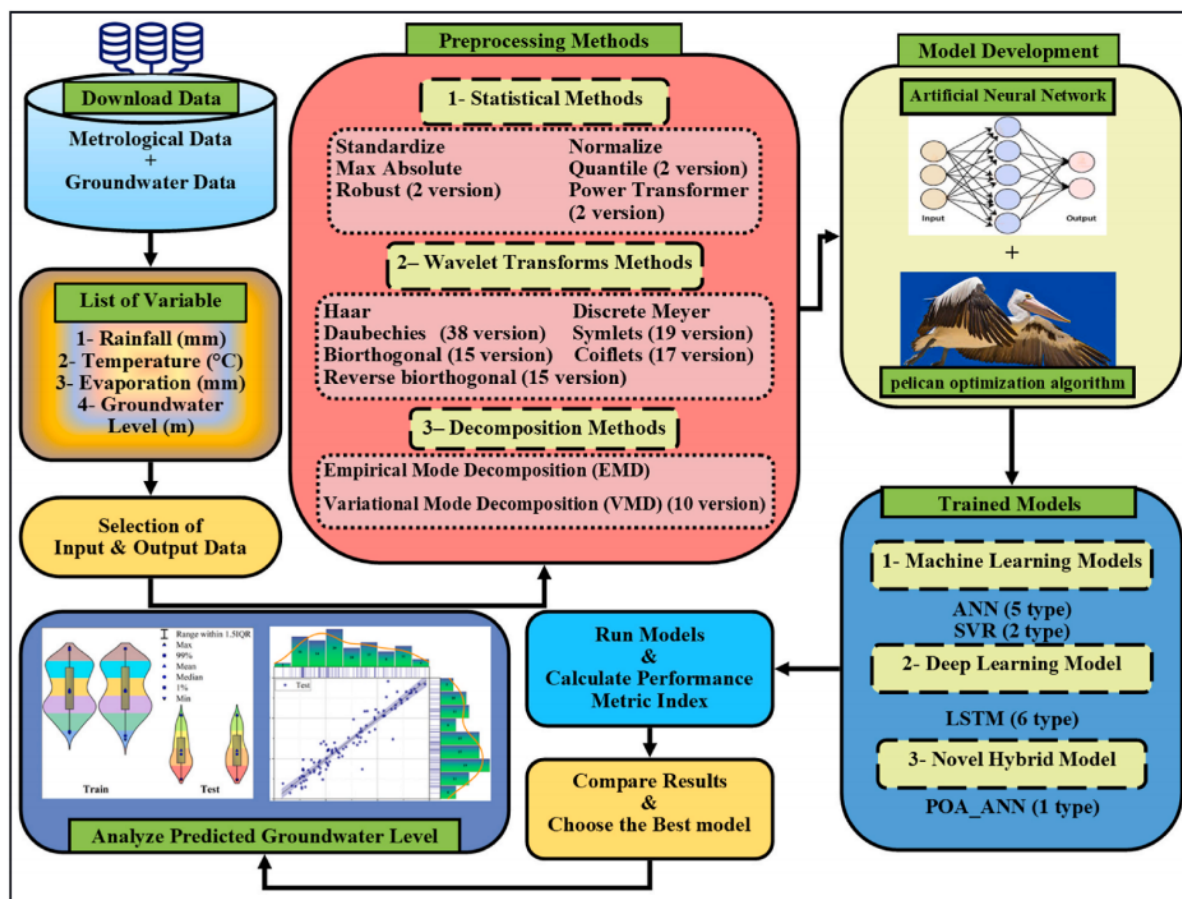


Рисунок 3 – Принципиальная схема предлагаемой методологии [27]

Figure 3 – Schematic diagram of the proposed methodology [27]

В дополнение приводим свежий пример иностранных авторов [27] с попыткой применения искусственного интеллекта и машинного обучения как методологии к исследованию режима грунтовых вод, что показано на рисунке 3.

В предлагаемой авторами работы [27] методологии используются вероятностно-статистические методы. Конкретные примеры использования данной методологии в практике гидрогеологии и строительства не приведены. Это свидетельствует о незавершенности искусственного интеллекта и машинного обучения как методологии к исследованию режима грунтовых вод. Исследования надо продолжать.

ОБСУЖДЕНИЕ

Обзор отечественных и зарубежных авторов показал, что прямых публикаций по теме статьи нет. Имеются лишь отдельные вопро-

сы, близкие к тематике представленной работы, связанные со строительством подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов. При этом проанализированы особенности осушения слабопроницаемых водонасыщенных грунтов, обладающих подвижностью. Предложены к рассмотрению в качестве примера мобильные передвижные участки систем строительного водоотлива и водопонижения, скорость монтажа и демонтажа которых соизмерима со скоростью передвижения разработки траншеи при открытом способе работ или проходческого щита при закрытом способе работ, например, для перегонного тоннеля метрополитена. Коснемся также вопросов искусственного интеллекта (ИИ).

Д-р техн. наук, проф. В.К. Финн в интервью «Независимой газете» 27.06.2018 г. сформулировал 13 признаков искусственного интеллекта, интернет-адрес:

https://www.ng.ru/nauka/2018-06-27/9_7253_intelligence.html

Признаки искусственного интеллекта (ИИ) по В.К. Финну:

- 1) возможность распознавания существенного в данных;
- 2) порождение последовательности: цель–план–действие;
- 3) возможность отбора посылок, релевантных целям;
- 4) рассуждение – получение следствий из имеющихся посылок;
- 5) принятие решений посредством аргументации;
- 6) рефлексия – способность оценивать свои знания и действия;
- 7) познавательное любопытство – возможность ответить на вопрос «Что такое?»;
- 8) способность к объяснению и к ответу на вопрос «Почему?»;
- 9) синтез познавательных процедур;
- 10) способность к обучению;
- 11) рационализация идей и превращение их в понятия;
- 12) способность объединять имеющиеся знания и создавать целостную картину рассматриваемого явления – способность к интеграции знаний;
- 13) адаптация знаний при изменении условий и жизненных ситуаций или коррекция теорий.

Попробуем использовать эти признаки как инструмент в рамках тематики данной статьи. Из 1-го признака следует, что ИИ – это поиск. Из 2-го – проект. Из 3-го – оптимизация. Из 4-го – решение. Из 5-го – аргументы. Из 6-го – оценка. Из 7-го – определение. Из 8-го – объяснение. Из 9-го – синтез. Из 10-го – обучение. Из 11-го – рационализация. Из 12-го – объединение. Из 13-го – обновление с уточнением знаний.

Обобщая, дадим комплексное определение ИИ для целей нашего исследования.

Искусственный интеллект – это поиск оптимального и аргументированного проектного решения проблемы с определением самооценки и объяснением на основе анализа результатов, с объединением и синтезом принципов рационального самообучения, с последующим уточнением и обновлением знаний об изучаемом объекте исследования.

Нетрудно заметить, что такое определение ИИ очень сильно напоминает действия научно-практического работника и творчески мыслящего опытного проектировщика со стрункой изобретателя, производящих жизненно важную наукоёмкую продукцию. Такое определение ИИ, возможно, является идеалом ИИ, и

даже, возможно, недостижимой мечтой. Поэтому многие исследователи ИИ рано или поздно приходят к выводу о невозможности полной замены творчески мыслящего человека системами ИИ.

Попробуем дать техническое определение ИИ как возможности применения самообучающихся рекурсивных компьютерных программ, связанных с какими угодно механизмами. В таком случае мы неизбежно приходим к механизации, автоматизации и роботизации строительного производства. Именно такую перспективу дальнейших исследований мы сейчас намечаем для нашей тематики защиты от подтопления в городском строительстве.

Напоследок покажем сравнительный пример расчёта по представленным формулам (4)-(5) для мобильного передвижного участка систем строительного водоотлива, скорость монтажа и демонтажа которых соизмерима со скоростью передвижения разработки траншеи при открытом способе работ. Основные обозначения показаны на рисунке 2.

По данным инженерно-геологических изысканий определили для водонасыщенного грунта стенок вытянутого котлована коэффициент фильтрации $k = 0,1$ м/сут, а также коэффициент водоотдачи $\mu = 0,05$. Расстояние от центра котлована до грунтовой стенки $B = 12$ м. Напор техногенных подземных вод $H_e = 16$ м. Напор воды на дне выработки $H_b = 6$ м. Дополнительно был определен коэффициент фильтрации крепления стенки котлована $k = 0,00108$ м/сут. Толщина ограждения $b = 0,6$ м. Толщина напорного водоносного слоя $M = 11$ м. Время проведения земляных работ $t = 10$ сут.

По формуле (4) определяем напор техногенных подземных вод в зоне пониженной проницаемости грунта около стенок строительной выработки по цепочке расчётов:

$$\begin{aligned}\eta &= 0,00108/0,1 = 0,0108, \\ a &= 0,1 \cdot 11/0,05 = 22 \text{ м}^2/\text{сут}, \\ \beta &= \frac{1 - \sqrt{0,0108}}{1 + \sqrt{0,0108}} = 0,8116, \\ H_1 &= 16 - 10 \cdot (1 - 0,8116) \cdot \\ &\cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{0,6}{2 \cdot \sqrt{0,0108 \cdot 22 \cdot 10}}\right) = 14,5 \text{ м}.\end{aligned}$$

По формуле (5) находим односторонний водопиток техногенных подземных вод к строительной выработке с креплением

$$q_b = \frac{0,00108 \cdot 11 \cdot 10}{12 \cdot \sqrt{0,0108 \cdot 22 \cdot 10}} = 0,0642 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м}).$$

Далее для сравнения рассчитаем по формуле (4), пренебрегая наличием крепления стенки котлована.

Напор на стенке по формуле (4)

$$H_1 = 16 - 10 \cdot (1 - 0) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{0,6}{2 \cdot \sqrt{1 \cdot 22 \cdot 10}}\right) = 6,2 \text{ м}.$$

Обратим внимание, что стенка крепления необходима, прежде всего, для устойчивости грунта. Однако расчёт с учётом снижения её фильтрационных свойств показывает, что нестационарные напоры техногенных подземных вод в период проведения земляных работ уменьшаются гораздо медленнее вблизи котлована, что увеличивает опасность местных прорывов размягченного грунта. Поэтому разработанная методология расчёта по формулам (4) и (5) позволяет заблаговременно до начала земляных работ предусмотреть мероприятия по безопасности строительства в условиях техногенного подтопления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработку систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов предложено производить новым комплексным подходом с использованием методологии теории фильтрации воды и газа в городском строительстве, методов компьютерного моделирования фильтрации флюидов и производства работ с помощью электронных таблиц, с привлечением новых технологий искусственного интеллекта и обучения машин. Перспективой дальнейших научных исследований является углубление обозначенного комплексного подхода к защите от подтопления в городском строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hai-Min Lyu, Shui-Long Shen, Yong-Xia Wu, An-Nan Zhou. Calculation of groundwater head distribution with a close barrier during excavation dewatering in confined aquifer // *Geoscience Frontiers*. 2021; 12 (2): 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.002>
2. Shousha M.A., Basha A.M., El-enany M.A., Moghazy H.M.. Effect of using grouted vertical barrier on seepage characteristics under small hydraulic structures // *Alexandria Engineering Journal*. 2020; 59 (1): 441-455. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.013>
3. Siacara A.T., Napa-García G.F., Beck A.T., Futai M.M. Reliability analysis of earth dams using direct coupling // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020; 12 (2): 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.012>
4. El-Molla D.A, El-Molla M.A. Reducing the conveyance losses in trapezoidal canals using compacted earth lining // *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12(3): P. 2453-2463. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.018>
5. Barkhordari S., Shahdany S.M.H. A systematic approach for estimating water losses in irrigation canals // *Water Science and Engineering*. 2022; 15(2): 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.02.004>
6. Mansour M.A., Aly M.M. A simulation-optimization approach for optimal design of dewatering systems in unconfined strata // *Alexandria Engineering Journal*. 2020; 59(2): 839-850. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.02.029>
7. Chang H., Ross A.R. *Climate Change, Urbanization, and Water Resources*. Portland: Springer, 2024. 198 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49631-8>
8. Kumareswaran K., Jayasinghe G.Y. *Green Infrastructure and Urban Climate Resilience*. Switzerland: Springer, 2023. 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37081-6>
9. Paolini R., Santamouris M. *Urban Climate Change and Heat Islands*. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023. 353 p. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04618-6>
10. Pathak B., Dubey R.S. *Climate Change and Urban Environment Sustainability*. Singapore: Springer, 2023. 330 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6>
11. Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R. *Urban Climate, Adaptation and Mitigation*. Amsterdam, Cambridge, Oxford : Elsevier, 2023. 378 p. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01553-7>
12. Giannini L.M., Younsi S., Burchini B., Deiana R., Cassiani G., Ciampi P. Integrating geophysical methods, InSAR, and field observations to address geological hazards and buried archaeological features in urban landscapes // *Journal of Applied Geophysics*. 2025; 238. P. 105726. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105726>
13. Martinez S., Vellei M., Rendu M., Brangeon B., Griffon C., Bozonnet E. A methodology to bridge urban shade guidelines with climate metrics // *Sustainable Cities and Society*. 2025; 124. P. 106322. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106322>
14. Shen P., Li Y., Gao X., Chen S., Cui X., Zhang Y., Zheng X., Tang H., Wang M. Climate adaptability of building passive strategies to changing future urban climate // *Nexus Review*. 2025; 2. I. 2. P. 100061. <https://doi.org/10.1016/j.nynexs.2025.100061>
15. Shen P., Li Y., Gao X., Zheng Y., Huang P., Lu A., Gu W., Chen S. Recent progress in building energy retrofit analysis under changing future climate //

Applied Energy. 2025; 383. P. 125441. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125441>

16. Shen P., Wang M., Liu J., Ji Y. Hourly air temperature projection in future urban area by coupling climate change and urban heat island effect // *Energy and Buildings*. 2023; 279. P. 112676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112676>

17. Liu S., Wang Y., Liu X., Yang L., Zhang Y., He J. How does future climatic uncertainty affect multi-objective building energy retrofit decisions? Evidence from residential buildings in subtropical Hong Kong // *Sustainable Cities and Society*. 2023; 92. P. 104482. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104482>

18. Fernandes M., Coutinho B., Rodrigues E. The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance // *Journal of Cleaner Production*. 2024; 445. P. 141255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141255>

19. Abdeen A., Mushtaha E., Hussien A., Ghennai C., Maksoud A., Belpoliti V. Simulation-based multi-objective genetic optimization for promoting energy efficiency and thermal comfort in existing buildings of hot climate // *Results in Engineering*. 2024; 21. P. 101815. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101815>

20. Li J., Zhai Z., Li H., Ding Y., Chen S. Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions // *Journal of Cleaner Production*. 2024; 442. P. 140967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140967>

21. Tomrukcu G., Ashrafi T. Climate-resilient building energy efficiency retrofit: Evaluating climate change impacts on residential buildings // *Energy and Buildings*. 2024; 316. P. 114315. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114315>

22. Shen P. Building retrofit optimization considering future climate and decision-making under various mindsets // *Journal of Building Engineering*. 2024; 96. P. 110422. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110422>

23. Caron C., Lauret P., Bastide A. Machine Learning to speed up Computational Fluid Dynamics engineering simulations for built environments: A review // *Building and Environment*. 2025; 267. P. 112229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112229>

24. Вандер П.Д. Python для сложных задач: наука о данных. Санкт-Петербург: Питер, 2025. 592 с.

25. Куликова И.В. Нейросети на Python. Основы ИИ и машинного обучения. Наука и техника. Санкт-Петербург, 2025. 304 с.

26. Сологеев В.И. Фильтрационные расчёты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: монография. Омск: СибАДИ, 2002. 416 с.

27. Mohsen Saroughi, Ehsan Mirzania, Mohammed Achite, Okan Mert Katipo, Nadhir Al-Ansari, Dinesh Kumar Vishwakarma, Il-Moon Chung, Maha Awjan Alreshidi, Krishna Kumar Yadav. Evaluate effect of 126 pre-processing methods on various artificial intelligence models accuracy versus normal mode to predict groundwater level // *Heliyon*. 2024; 10. P. e29006. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29006>

REFERENCES

1. Hai-Min Lyu, Shui-Long Shen, Yong-Xia Wu, An-Nan Zhou. Calculation of groundwater head distribution with a close barrier during excavation dewatering in confined aquifer. *Geoscience Frontiers*. 2021; 12 (2): 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.002>

2. Shousha M.A., Basha A.M., El-enany M.A., Moghazy H.M. Effect of using grouted vertical barrier on seepage characteristics under small hydraulic structures. *Alexandria Engineering Journal*. 2020; 59 (1): 441-455. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.013>

3. Siacara A.T., Napa-García G.F., Beck A.T., Futai M.M. Reliability analysis of earth dams using direct coupling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020; 12 (2): 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.012>

4. El-Molla D.A., El-Molla M.A. Reducing the conveyance losses in trapezoidal canals using compacted earth lining. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12. (3): 2453-2463. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.018>

5. Barkhordari S., Shahdany S.M.H. A systematic approach for estimating water losses in irrigation canals. *Water Science and Engineering*. 2022; 15(2): 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.02.004>

6. Mansour M.A., Aly M.M. A simulation-optimization approach for optimal design of dewatering systems in unconfined strata. *Alexandria Engineering Journal*. 2020; 59 (2): 839-850. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.02.029>

7. Chang H., Ross A.R. Climate Change, Urbanization, and Water Resources. Portland, Springer, 2024. 198 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49631-8>

8. Kumareswaran K., Jayasinghe G.Y. Green Infrastructure and Urban Climate Resilience. Switzerland: Springer, 2023. 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37081-6>

9. Paolini R., Santamouris M. Urban Climate Change and Heat Islands. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023. 353 p. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04618-6>

10. Pathak B., Dubey R.S. Climate Change and Urban Environment Sustainability. Singapore: Springer, 2023. 330 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6>

11. Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R. Urban Climate, Adaptation and Mitigation. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023. 378 p. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01553-7>

12. Giannini L.M., Younsi S., Burchini B., Deiana R., Cassiani G., Ciampi P. Integrating geophysical methods, InSAR, and field observations to address geological hazards and buried archaeological features in urban landscapes. *Journal of Applied Geophysics*. 2025; 238: P. 105726. <https://doi.org/10.1016/j.japgeo.2025.105726>

13. Martinez S., Vellei M., Rendu M., Brangeon B., Griffon C., Bozonnet E. A methodology to bridge urban shade guidelines with climate metrics. *Sustainable Cities and Society*. 2025; 124. P. 106322. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106322>

14. Shen P., Li Y., Gao X., Chen S., Cui X., Zhang Y., Zheng X., Tang H., Wang M. Climate adaptability of building passive strategies to changing future urban climate. *Nexus Review*. 2025; 2. I. 2. P. 100061. <https://doi.org/10.1016/j.nexs.2025.100061>
15. Shen P., Li Y., Gao X., Zheng Y., Huang P., Lu A., Gu W., Chen S. Recent progress in building energy retrofit analysis under changing future climate. *Applied Energy*. 2025; 383, P. 125441. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125441>
16. Shen P., Wang M., Liu J., Ji Y. Hourly air temperature projection in future urban area by coupling climate change and urban heat island effect. *Energy and Buildings*. 2023; 279, P. 112676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112676>
17. Liu S., Wang Y., Liu X., Yang L., Zhang Y., He J. How does future climatic uncertainty affect multi-objective building energy retrofit decisions? Evidence from residential buildings in subtropical Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*. 2023; 92, P. 104482. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104482>
18. Fernandes M., Coutinho B., Rodrigues E. The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 445 P. 141255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141255>
19. Abdeen A., Mushtaha E., Hussien A., Ghenai C., Maksoud A., Belpoliti V. Simulation-based multi-objective genetic optimization for promoting energy efficiency and thermal comfort in existing buildings of hot climate. *Results in Engineering*. 2024; 21, P. 101815. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101815>
20. Li J., Zhai Z., Li H., Ding Y., Chen S. Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 442, P. 140967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140967>
21. Tomrukcu G., Ashrafian T. Climate-resilient building energy efficiency retrofit: Evaluating climate change impacts on residential buildings. *Energy and Buildings*. 2024; 316, P. 114315. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114315>
22. Shen P. Building retrofit optimization considering future climate and decision-making under various mindsets. *Journal of Building Engineering*. 2024; 96, P. 110422. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110422>
23. Caron C., Lauret P., Bastide A. Machine Learning to speed up Computational Fluid Dynamics engineering simulations for built environments: A review. *Building and Environment*. 2025; 267, P. 112229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112229>
24. Vander P.D. Python dlya slozhnykh zadach: nauka o dannykh. Sankt-Peterburg: Piter, 2025; 592 p (in Russ.).
25. Kulikova I.V. Neyroseti na Python. Osnovy II i mashinnogo obucheniya. Sankt-Peterburg: Nauka i tekhnika, 2025; 304 p (in Russ.).
26. Sologaev V.I. Fil'tratsionnyye raschoty i komp'yuternoye modelirovaniye pri zashchite ot podtopleniya v gorodskom stroitel'stve: monografiya. Omsk: Izd-vo SibADI, 2002. 416 p. (in Russ.).
27. Mohsen Saroughi, Ehsan Mirzania, Mohammed Achite, Okan Mert Katipo, Nadhir Al-Ansari, Dinesh Kumar Vishwakarma, Il-Moon Chung, Maha Awjan Alreshidi, Krishna Kumar Yadav. Evaluate effect of 126 pre-processing methods on various artificial intelligence models accuracy versus normal mode to predict groundwater level *Heliyon*. 2024;10 P. e29006. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29006>

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 I. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Higher Attestation Commission (HAC, RF), Professor of the Department of Industrial and Civil Construction, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (644050, Russia, Omsk, Mira St., 5)

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

SPIN-code: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org