

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГИИ ФИЛЬТРАЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАЩИТЫ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.И. Сологаев

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Борьба с подтоплением остаётся актуальной проблемой. Применение аналогии фильтрации воды и электрического тока имеет цель защиты от подтопления окружающей среды, территорий застройки и автомобильных дорог в городах. Записывая закон Ома аналогично закону фильтрации Дарси, достигаем лучшего соответствия их аналогии. Это, в свою очередь, даёт возможность развивать новые технологии для защиты от подтопления в городском строительстве, например электроосмотическое водопонижение и его моделирование. Такие технологии позволяют осушать глинистые грунты.

Методы и материалы. Рассмотрены совместно закон Дарси, закон Ома и закон электроосмотической фильтрации. Дана методология моделирования строительного водопонижения с учётом суммарного эффекта двух физических законов фильтрации воды и электроосмоса, оптимально сочетая высотное геометрическое расположение базисов дренирования и контактных электродов. Представлены варианты осушения глинистого грунта при действии электрического поля. При совместном использовании в осушаемом грунте сил гравитации и электрических сил постоянного тока суммарная скорость фильтрации складывается из составляющей по закону Дарси и другой составляющей скорости движения воды – электроосмотической фильтрации. Дополнительной особенностью совместного моделирования в пористой среде фильтрации воды и электроосмоса является то, что массив водоупорной части грунта и его части, относящейся к диэлектрику, могут не совпадать. Такая сложность модели преодолевается её разбиением на модули, которые затем объединить с соблюдением балансового принципа, сшивая модули по границам. Для продолжения научной дискуссии приведен краткий, но информативный обзор международных публикаций по рассматриваемой теме.

Обсуждение. Методология комплексного расчёта и моделирования совместных процессов фильтрации воды в грунтах, протекания электрического тока и электроосмотической фильтрации может найти полезное применение при разработке эффективной защиты от подтопления в городском строительстве. Рекомендована последовательность алгоритмических шагов моделирования. Первоначально рекомендуется проводить грубое моделирование в электронных таблицах на персональных компьютерах и мобильных телефонах. Далее следует применить другой подход моделирования. Базируясь на первоначальных грубых моделях предыдущего шага, надо записать алгоритмы на языке программирования. Скомпилированная модель исследуемых процессов фильтрации и электроосмоса позволит существенно повысить надёжность проектирования защиты от подтопления.

Заключение. Приведено сравнение совместного применения средств строительного водопонижения разной физической сущности при одновременных процессах гравитационной фильтрации подземной воды и пропускании постоянного электрического тока через осушаемый грунт, что вызывает дополнительный эффект электроосмоса. Предложено по-новому применять аналогию фильтрации воды и электрического тока с целью достижения более эффективных результатов инженерной деятельности путем моделирования защиты от подтопления территорий застройки, обеспечивая безопасность городского строительства при повышении уровня подземных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подтопление, подземные воды, теория фильтрации воды, электроосмос, городское строительство.

Поступила 28.04.21, принята к публикации 31.08.21 .

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., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Сологаев, В.И. Применение аналогии фильтрации и электричества при моделировании защиты от подтопления в городском строительстве / В.И. Сологаев. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-450-462> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 450-462.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-450-462>

USE OF FILTRATION AND ELECTRICITY ANALOGY IN SIMULATION OF UNDERFLOODING PROTECTION IN URBAN CONSTRUCTION

Valery I. Sologaev

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The fight against underflooding remains an urgent problem. The application of the analogy between water filtration and electric current has the goal of protecting the environment, built-up areas and, in particular, highways in cities from underflooding. Writing Ohm's law similarly to Darcy's filtration law, we achieve a better match to their analogy. This, in turn, makes it possible to develop new technologies for protection against underflooding in urban construction, for example, electroosmotic dewatering and its modeling. Such technologies make it possible to drain clayey soils.

Methods and materials. Darcy's law, Ohm's law and the law of electroosmotic filtration are considered together. A methodology for modelling construction dewatering is given, taking into account the combined effect of the two physical laws of water filtration and electroosmosis, optimally combining the high-altitude geometric arrangement of drainage bases and contact electrodes. The options for draining clay soil under the action of an electric field are presented. With the combined use of gravitational forces and electric direct current forces in the drained soil, the total filtration rate is the sum of the Darcy's law component and another component of the water velocity – electroosmotic filtration. An additional feature of joint modelling in a porous medium of water filtration and electroosmosis is that the mass of the water-resistant part of the soil and its part related to the dielectric may not coincide. This complexity of the model is overcome by dividing it into modules, which can then be combined in compliance with the balance principle, stitching modules along the boundaries. To continue the scientific discussion, a short but informative overview of international publications on the topic under consideration is given.

Discussion. The methodology for complex calculation and modelling of the joint processes of water filtration in soils, the flow of electric current and electroosmotic filtration can find useful application in the development of effective protection against underflooding in urban construction. A sequence of algorithmic modelling steps is recommended. Initially, it is recommended to run rough spreadsheet simulations on personal computers and mobile phones. Next, a different modelling approach should be applied. Based on the initial rough models of the previous step, it is necessary to write the algorithms in the programming language. The compiled model of the investigated filtration and electroosmosis processes will significantly increase the reliability of the design of protection against underflooding.

Conclusion. A comparison is made of the joint use of construction dewatering means of different physical essence, with simultaneous processes of gravitational filtration of underground water and passing a direct electric current through the drained soil, which causes an additional effect of electroosmosis. It is proposed to apply in a new way the analogy of water filtration and electric current in order to achieve more effective results of engineering activities by modeling protection against underflooding of building areas, ensuring the safety of urban construction when the level of groundwater rises.

KEYWORDS: Underflooding, groundwater, the theory of water filtration, electromos, urban construction.

Submitted 28.04.21, revised 31.08.21.

The 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. Use of filtration and electricity analogy in simulation of underflooding protection in urban construction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 450-462. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-450-462>.

© Sologaev V.I., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Борьба с подтоплением остаётся актуальной проблемой, требующей решения. Надо более широко применять аналогию фильтрации воды и электрического тока с целью достижения эффективных результатов инженерной деятельности по защите окружающей среды, территорий застройки и, в частности, автомобильных дорог в городах, при повышении уровня подземных вод, то есть при подтоплении. Традиционное определение закона электрического тока, закона Ома, для этих целей не очень удобно. Записывая закон Ома аналогично закону фильтрации Дарси, достигаем лучшего соответствия их аналогии. Это, в свою очередь, даёт возможность развивать новые технологии для защиты от подтопления в городском строительстве, например, электроосмотическое водопонижение и его моделирование. Такие технологии позволяют осушать глинистые грунты, что обычно не эффективно стандартными методами с использованием гравитационного водоотлива и дренажа в городском строительстве и хозяйстве. Пробелом в научном знании по рассматриваемой теме являются детали моделирования, с которыми может столкнуться исследователь. Это и определило актуальность и новизну предпринятых научных изысканий.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Прежде всего необходимо описать рабочие гипотезы, феноменологию и термины по заявленной теме работы. При этом заострим внимание на наиболее точных для нас определениях в рамках данного исследования.

Закон Дарси ламинарного течения (фильтрации) воды в пористой среде является линейной феноменологической зависимостью скорости фильтрации воды V_ϕ от коэффициента фильтрации k_ϕ , разности напоров ΔH , обратно пропорциональной длине пути фильтрации L . Фильтрационный расход воды Q через поперечное сечение пористого грунта или материала с площадью живого сечения w по закону Дарси имеет вид

$$Q = w \cdot V_\phi = w \cdot k_\phi \cdot \frac{\Delta H}{L}. \quad (1)$$

Область применения закона Дарси охватывает подавляющее большинство случаев практического использования систем строительного водопонижения и дренажа. Это весьма убедительно было доказано в нашей стране В.М. Павилонским [1, 2, 3] и за рубежом

Х.В. Олсенем [4]. Отклонения от закона Дарси могут быть при весьма малых градиентах напора, а также при больших его значениях. При этом важно знать, что гипотеза о прекращении фильтрационного движения воды при малых градиентах напора до сих пор остаётся дискуссионной. Особенно при защите от загрязнения подземных вод в ходе распространения опасных загрязняющих веществ в водоносном пласте. В таком случае эта гипотеза о начальном градиенте напора не может быть принята на практике вследствие отсутствия запаса надёжности и повышенного риска загрязнения подземных вод как источника водоснабжения. Первоначально эту гипотезу предложил наш соотечественник академик Н.Н. Павловский в своей монографии 1922 года [5], а С.А. Роза экспериментально пытался её подтвердить в 1950 г., однако в конце концов признал, что хотя скорость фильтрации весьма мала, но не нулевая. Аномалию закона Дарси при малых градиентах напора отмечал и Я. Бэр из технологического института Израиля в монографии [6].

По закону Ома сила электрического тока I (которую в иностранных источниках чаще всего называют «интенсивность тока», особенно во Франции: *intensité du courant*) в привычно традиционной записи линейно зависит от разности электрических потенциалов ΔU и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению R . Этот закон, особенно в школьных курсах, обычно записывают в виде

$$I = \frac{\Delta U}{R}. \quad (2)$$

Для представления более точной аналогии двух вышеупомянутых законов, определение закона Ома лучше дать для интенсивности тока I . Это будет аналогично фильтрационному расходу воды по закону Дарси. Закон Ома в этом виде является линейной феноменологической зависимостью интенсивности тока I от коэффициента электрической проводимости λ (аналогия коэффициенту фильтрации), разности ΔU потенциалов (аналогия разности напоров) и обратно пропорциональной длине пути электрического тока L (аналогия длины пути фильтрации). Закон Ома в более редкой записи выглядит так:

$$I = \lambda \cdot w \cdot \frac{\Delta U}{L}, \quad (3)$$

где w – площадь поперечного сечения среды, проводящей электрический ток. Нетрудно за-

метить, что интенсивность тока I аналогична фильтрационному расходу воды Q через пористую среду по формуле (1). Это обстоятельство позволяет применять аналогию при моделировании фильтрационных процессов при защите от подтопления.

При этом отметим, что привычный ещё со средней школы русский термин «сила тока» семантически не очень удачен, а более редкий термин «интенсивность тока» лучше соответствует принципу аналогии. В русской технической литературе как раз привился первый термин (сила тока), однако в иностранных источниках, особенно западноевропейских – второй (интенсивность тока), что более удачно в контексте нашей статьи для понимания рассматриваемых процессов. Кроме того, само обозначение I (intensity) придаёт более точный смысл закону Ома. В последней форме (3) закон Ома позволяет более обоснованно строить формулы моделирования течения электрического тока через проводящий грунт или искусственный материал. Аналогией водоупора для электричества при этом будет являться диэлектрик, то есть среда, не пропускающая электрический ток.

Есть ещё и третья аналогия – закон электроосмотической фильтрации воды, которая происходит преимущественно в глинистых грунтах, под влиянием разности потенциалов ΔU постоянного электрического тока. Закон электроосмоса открыл Ф.Ф. Рейс в 1807 г., проф. Московского университета.

Этот закон обычно формулируют так: скорость электроосмотической фильтрации воды V_3 пропорциональна коэффициенту электроосмотической фильтрации k_3 , разности потенциалов ΔU и обратно пропорциональна длине пути электроосмотической фильтрации L . Фильтрационный расход воды Q_3 через поперечное сечение пористого грунта или материала с площадью живого сечения w по закону электроосмотической фильтрации имеет вид

$$Q_3 = k_3 \cdot w \cdot \frac{\Delta U}{L}. \quad (4)$$

Нетрудно заметить, что последний закон (4) почти полностью повторяет закон ламинарной фильтрации Дарси (1), за исключением причины движения, в первом случае для воды в виде разности фильтрационных напоров ΔH , в во втором случае – электрических потенциалов ΔU . Поэтому на практике закон электроосмотической фильтрации применяют в геофизических исследованиях в ходе инже-

нерно-геологических изысканий. При этом его используют лишь по потребности.

Такая потребность, например, возникала в начале 1990-х гг. при инженерно-геологических изысканиях для омского метро при разработке мероприятий по защите от подтопления данного объекта строительства и прилегающей городской территории. В этих научных исследованиях автор принимал непосредственное участие как научный руководитель и ответственный исполнитель. В настоящее время отказ от строительства омского метро является глобальной ошибкой на будущее, так как г. Омск в последние годы «тонет» в автомобильных пробках. Наш прогноз на будущее такой – строительство Омского метрополитена со временем будет возобновлено. Это необходимо городу, однако проект метро в будущем может быть изменён с учётом новых технологий строительства, которые могут появиться.

При защите от подтопления в городском строительстве электроосмотическую фильтрацию применяют редко. Обычно такая фильтрация служит лишь в качестве дополнения к гравитационной фильтрации, происходящей по закону Дарси. Тем не менее следует подчеркнуть, что в глинистых грунтах это дополнение (электроосмос) по эффективности осушения грунта может превышать гравитационное дренирование, происходящее под влиянием силы тяжести [7].

При совместном использовании в осушаемом грунте сил гравитации и электрических сил постоянного тока суммарная скорость фильтрации складывается из составляющей по закону Дарси и другой составляющей скорости движения воды – электроосмотической фильтрации. Дополнительной особенностью совместного моделирования в пористой среде фильтрации воды и электроосмоса является то, что массив водоупорной части грунта и его части, относящейся к диэлектрику, могут не совпадать. Чаще всего так и случается. Например, грунтовые воды залегают на региональном водоупоре, а этот же водоупор, в частности глина, насыщен водой и проводит электрический ток. Такая сложность модели преодолевается её разбиением на модули, которые затем можно объединить с соблюдением балансового принципа, сшивая модули по границам.

Моделирование строительного водопонижения с учётом такого суммарного эффекта двух физических воздействий можно производить, оптимально сочетая высотное геометрическое расположение базисов дренирова-

ния и контактных электродов. При этом надо всегда иметь в виду следующие соображения. В первом случае, по закону Дарси, причиной движения воды является разность напоров. Во втором случае, при электроосмотической фильтрации, причина другая – разность электрических потенциалов. Важно так совместить оба процесса, чтобы они взаимно усиливали друг друга и чтобы в результате фильтрационные водопритоки к дренам и скважинам выросли до максимально возможных величин. Тогда будет достигнуто наибольшее осушение массива грунта основания, разрабатываемого в процессе производства строительных работ. Грунт станет более устойчивый на откосах котлованов и траншей. В результате уровень безопасности проведения земляных работ значительно повысится.

В ходе такой исследовательской работы, сопровождающей проектирование и сам технологический процесс строительного водопонижения, крайне желательно последовательно производить анализ и моделирование фильтрационных течений, происходящих на территории, в зданиях и сооружениях в период городского строительства. Первые оценочные расчёты движения воды в грунте или материале следует делать, применяя математический анализ. При этом рекомендуется строить самые простые геометрические схемы фильтрации с тем, чтобы сильно математику не усложнять.

Как обычно, наиболее простой расчётной схемой является одномерный стационарный процесс в декартовой системе координат. Решив такую простейшую задачу, дальше можно перейти, например, к одномерной осесимметричной постановке, при условии, что это соответствует геометрии строительного объекта и прилегающей территории. Это позволит более точно и, следовательно, более надёжно проводить расчёт и моделирование подтопления и дренирования объекта капитального строительства.

Следующим шагом дальнейшего усложнения (и уточнения) исследования подтопления является переход от стационарных задач к нестационарным. При этом необходимо учитывать время процесса осушения водоносного пласта, залегающего в основании строительного объекта. Для сравнения: в общей теории автоматического управления (ТАУ) такие процессы обычно называют переходными, а продолжительность перехода – временем установления.

На объектах защиты от подтопления установление нестационарных процессов дви-

жения подземных вод протекает не столь быстро, а иногда эти процессы вообще не устанавливаются. Это существенно зависит от граничных и начальных условий области фильтрации, то есть от её краевых условий. Кроме того, городское строительство обратно влияет на геологические процессы в грунтах оснований строительной площадки. Поэтому, сохраняя реалистичность, не во всех случаях необходимо проводить аналитические расчёты времени установления фильтрационных процессов.

Напротив, гораздо надёжнее построить постоянно действующую компьютерную нестационарную модель фильтрации подземных вод для объекта строительства и использовать её при осуществлении производства работ по защите от подтопления. В такую перманентную имитационную модель надо лишь время от времени вносить поправки на основе мониторинга (наблюдения) за гидрогеологией объекта городского строительства в ходе производимых работ. Для мониторинга можно использовать не только наблюдательные скважины, но и доступные выемки и понижения рельефа при условии, что они способны без искажения отражать поведение уровней подземных вод в геологическом массиве на исследуемой строительной площадке.

Рассмотрим особенности методологии теории и практики расчётов и моделирования электроосмотического водопонижения на основе упомянутых трёх законов: Дарси, Ома и электроосмотической фильтрации. Технологию обустройства электроосмотического водопонижения осуществляют в такой последовательности. Вначале надо наметить расположение водопонизительных скважин или дрена, а также положительных и отрицательных электродов в грунте для пропускания через него постоянного электрического тока. По закону электроосмоса фильтрация воды в грунте при воздействии поля постоянного электрического тока будет направлена в направлении к катоду, то есть к отрицательному электроду. В условиях строительной площадки напряжение электрического тока по условиям безопасности рекомендуется назначать в пределах 40–60 В, так принято в отечественной практике. В строительстве за рубежом этот диапазон ещё шире 15–100 В [8].

В качестве отрицательного электрода, к которому присоединяют электрический провод от соответствующего контакта источника постоянного тока, следует выбрать дрена или скважину, изготовленную из материала,

хорошо проводящего электрический ток. Величина электрической проводимости этого материала должна быть не меньше, чем у проводника (электрического провода). В противном случае может возникнуть нежелательное дополнительное сопротивление на дрене или скважине, что приведёт к неэффективному использованию электрической энергии при создании поля напряжений, достаточного для протекания процесса электроосмотической фильтрации в осушаемом грунте. Тогда затраты времени и средств на применение технологии электроосмоса с целью водопонижения и дренажа будут не рационально вышены.

В рамках рассматриваемой комплексной строительной технологии наиболее актуальным является осушение глинистых грунтов, глин и суглинков. Обычные методы водопонижения тут мало эффективны. Воздействие электроосмоса на глинистый грунт может существенно повысить его водоотдачу. Остаточную влажность глинистого грунта в конце периода водопонижения при воздействии электроосмоса можно рассчитать по рекомендациям Г.Н. Жинкина, изложенными в монографии [9]. Эта влажность глинистого грунта в ходе проектирования строительного водопонижения может быть определена по следующей формуле:

$$W_k = \frac{3 \cdot W_p + W_m}{4}, \quad (5)$$

где W_p – влажность предела раскатывания; W_t – влажность предела текучести.

В ходе производства водопонижения с применением электроосмоса водоотдача грунта увеличивается, грунт осушается более эффективно, чем без электроосмоса. При этом коэффициент водоотдачи глинистого грунта, обработанного электроосмосом, может быть записан в виде

$$\mu_{\text{э}} = W_{\text{оэ}} - W_{\text{ок}}, \quad (6)$$

где $W_{\text{оэ}}$ – объёмная влажность грунта в естественном состоянии; $W_{\text{ок}}$ – объёмная влажность этого же грунта на заключительном этапе строительного водопонижения с применением технологии электроосмоса.

Эффективность осушения глинистого грунта при действии электрического поля постоянного тока на данный грунт можно ещё более повысить. Для этого к массиву осушаемого грунта надо дополнительно приложить вакуум

в базисах дренирования установок строительного водопонижения. Вакуум можно обеспечить техническими средствами по двум возможным вариантам.

Первым вариантом создания вакуума может быть монтаж специальных насосов для создания вакуума, расположенных на поверхности земли. Таким способом обычно создают неглубокое водопонижение, в пределах нескольких метров глубины, например, с применением иглофильтров. Этот вариант не очень эффективен в силу своей ограниченности по глубине. Поэтому совмещать его с электроосмосом не рекомендуется.

Вторым вариантом является создание вакуума под уровнем земли в наиболее глубоких точках установок водопонижения, например, на уровне фильтров водопонижительных скважин. Этот вариант позволяет создать максимально глубокое водопонижение, так как точки приложения вакуума к водонасыщенной грунтовой массе будут находиться на самых низких высотных отметках. Техническим средством создания вакуума в этом случае могут быть водоструйные насосы (эжекторы), сопла которых принимают поток рабочей жидкости (воды), закачиваемой под напором с поверхности земли.

Второй вариант создания вакуума с технической точки зрения сложный, но более эффективный для водопонижения. В этом случае насосы должны быть применены двух разных типов. Первый тип насосов – водоструйные эжекторы. Они располагаются под землёй, в нижней части скважин. По конструкции они не имеют трущихся частей. Их основной деталью являются сопла. Такая конструкция достаточно надёжна и может работать с водой, содержащей частицы грунта. Второй тип – насосы, располагаемые на поверхности земли, по конструкции обычно центробежные, при этом, наилучшими являются фекальные насосы для перекачки загрязнённых жидкостей. Их задача заключается в создании напора рабочей жидкости (воды), которая не откачивается из скважины, а, наоборот, закачивается в неё под избыточным давлением. Достигая по первой трубе отметки низа скважины, рабочая жидкость проходит через сопло. Возникает вакуум, который через фильтр скважины распространяется в прилегающее пространство водоносного пласта, подлежащего осушению. Под влиянием вакуума приток подземных вод в скважину увеличивается. Эти воды поступают через фильтр в полость скважины, где расположен эжектор, и смешиваются с рабочей

жидкостью, вытекающей вертикально вверх из сопла. Далее смесь подземных вод и рабочей жидкости поднимается вверх по второй трубе на уровень поверхности земли и изливается в накопительный резервуар, откуда излишки воды самотёком отводятся в качестве дебита водопонижительной скважины.

Объединённый закон Дарси и электроосмоса для водонасыщенного глинистого грунта можно записать в следующем виде [8, 9, 10]

$$Q_o = w \cdot \left(\frac{k \cdot \Delta H}{L} + \frac{k_3 \cdot \Delta U}{L} \right), \quad (7)$$

где первая дробь в скобках – скорость фильтрационного течения воды по Дарси; вторая дробь – скорость движения воды в грунте под влиянием электроосмоса. В случае совпадения векторов обеих скоростей эффективность осушения грунта будет повышаться. Задача проектировщика данной технологии – обеспечить максимальное совпадение векторов обеих скоростей. Кроме того, в период строительства необходим технический контроль выполнения этого условия в условиях строительной площадки. С этой целью крайне желательна организация мониторинга процесса строительного водопонижения, например с помощью системы наблюдательных скважин.

Типичная установка строительного водопонижения с применением электроосмоса изображена на рисунке 1. Знаком «-» обозначены водопонижительные скважины, изготовленные из токопроводящего материала, обычно из стали. Это катоды, к которым происходит электроосмотическая фильтрация воды. Знаком «+» показаны аноды, то есть контакты, к

которым присоединяют положительный полюс источника постоянного тока.

В качестве анодов удобнее всего выбрать металлический стальной шпунт. Тогда он будет выполнять сразу две полезные функции, то есть служить электрическим контактом и удерживать от обрушения грунт на стенках траншеи или котлована. Уровень грунтовых вод (УГВ) обозначает свободную поверхность подземных вод со значением атмосферного давления. Выше УГВ расположена капиллярная зона неполного водонасыщения, поровое давление в которой ниже атмосферного. Грунтовые воды расположены между УГВ и водоупором. Водоупорная поверхность в данном примере схематизирована и совпадает с горизонтальной осью ξ .

На рисунке 1 горизонтальная координата ξ является обобщённой, при этом возможны два случая. На рисунке 1 горизонтальная координата ξ является обобщённой, при этом возможны два случая. В первом случае координата ξ является декартовой, которую обычно обозначают x . Этот случай относится к двухрядной установке строительного водопонижения, обычно для вытянутого объекта, например для прямолинейной траншеи. Это самая простая фильтрационная задача, которая является одномерной. Во втором случае координата ξ является радиальной, её принято обозначать как r . Данный случай относится к контурной установке строительного водопонижения. Эта фильтрационная задача является тоже одномерной, но в радиальной системе координат. Примером строительного объекта тут может быть котлован компактной формы в плане.

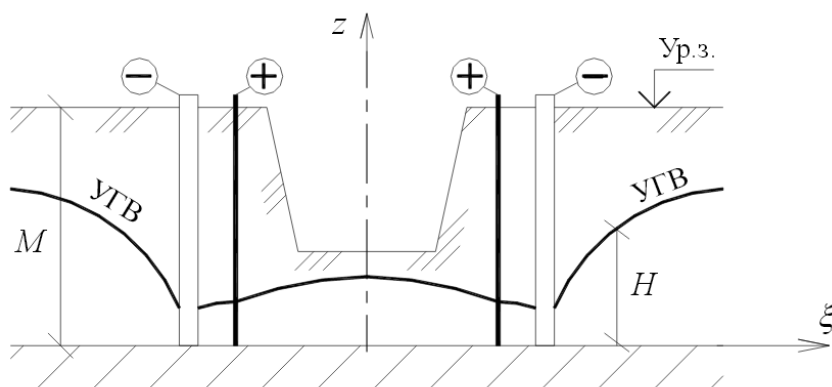


Рисунок 1 – Схема строительного водопонижения с применением электроосмоса

Figure 1 – Scheme of construction dewatering using electroosmosis

Источник: составлено автором

Source: compiled by the author

В идеальном случае форма котлована в плане (на виде сверху) является круглой. Такие случаи редки, но всё же могут встречаться в строительной практике. Например, при производстве водопонижения для строящейся насосной станции, круглой в плане. В других случаях формы котлованов в плане могут быть не круглыми, а лишь компактными, но их можно условно сводить к круглому котловану. Для этого существуют специальные методики приведения реальных котлованов к условно круглым в плане.

Большинство этих методик используют приведение котлованов к условно круглым в плане, основанное на равенстве притоков подземных вод в реальный котлован и условно круглый. Однако в некоторых случаях производства водопонижения критическим показателем является не приток, а положение уровня подземных вод (УПВ). Например, при проведении строительно-монтажных работ в котловане положение УПВ при работе установки водопонижения должно быть не ближе 0,5 м. В таком случае критерии приведения к условно круглому котловану будут иные, они в основном не проработаны до сих пор. Это может быть одним из направлений дальнейших исследований.

Следует отметить два подхода к явлению электроосмотической фильтрации. Первый подход феноменологический, его сущность выражена формулой (4). Это оправдано хаотическим распределением пор в фильтрующих грунтах и материалах объекта строительства, поэтому параметры закона определяют экспериментальным путём. Данный подход получил широкое распространение в практике инженерно-геологических изысканий для строительства.

Важность этого подхода в настоящее время подтверждается популярностью публикаций в международных базах, таких как Scopus. Например, авторы из Чили [11] исследовали электроосмотический дренаж для свалок. Горнодобывающая промышленность является важнейшим видом экономической деятельности в Чили, которая является крупнейшим экспортером меди в мире. При этом горнодобывающая промышленность оказывает значительное воздействие на окружающую среду, например производит большое количество твердых отходов. Из-за высокого содержания влаги в твердых отходах на свалках могут возникать проблемы с физической стабилизацией вследствие того, что водные растворы удерживаются в твердых частицах,

которые не стекают под действием силы тяжести. Электроосмотический дренаж был предложен как метод уменьшения влажности и, таким образом, повышения устойчивости свалок. Авторы поставили вопрос, зависит ли объём осушенного раствора от процентного содержания мелких частиц в твёрдой породе. Представленная работа, основанная на экспериментальном материале, была произведена для решения данного вопроса. Результаты показали, что электроосмотический дренаж был более эффективным, чем гравитационный дренаж. Применительно к городскому строительству дренаж свалок весьма актуален.

Другой интересный пример применения электроосмоса представлен в статье [12] авторов из Ирана. Разработка высокоэффективных землеройных машин и механизмов с малым энергопотреблением имеет большое значение для строительства. Использование технологии электроосмоса, создающей на поверхности рабочего органа землеройных машин тонкую плёнку воды для уменьшения адгезии грунта привлекло внимание исследователей в последние два десятилетия. В статье исследован ковш для захвата грунта с оптимизированными рабочими параметрами. Экспериментальные результаты показали, что снижение адгезии грунта было наибольшим для ковша с соотношением площадей положительного/отрицательного электрода 1/4 и подачей на электроды 24 В в течение 30 с. Результаты также показывают, что при использовании технологии электроосмоса адгезия к грунту снизилась на 29,8–90% по сравнению с обычными технологиями разработки грунта. Попутно отметим, что идея встречалась ранее. Автор ещё в 1980-х гг. обсуждал практическое применение этого эффекта электроосмоса с омскими изыскателями при вытаскивании обсадных труб скважин из глинистых грунтов.

В ходе освоения технологии электроосмоса важно представлять область его применимости к различным грунтам и материалам. Авторы статьи [13] из Южно-китайского технологического университета обратили внимание на распределение размеров пор фильтрующей среды. Использован феноменологический подход. Проведены эксперименты на трех типах глинистой почвы с низкой проницаемостью. Предложена методика для расчёта электроосмотической проницаемости глинистого грунта.

Второй подход к электроосмотической фильтрации рассматривает движение воды под влиянием электрического тока в упорядоченных

доченной пористой среде. Характерным примером подобного исследования является методология, опубликованная в монографии К.П. Тихомоловой [14]. Такой подход более характерен для нужд химической промышленности. В частности, он применяется при изготовлении полимерных изделий для облегчения вытягивания волокон. Для целей строительства такой подход может найти применение в области искусственного улучшения свойств грунтов оснований с помощью обработки их полимерами. Направление это пока тоже мало исследовано.

Интересным направлением, развиваемым в настоящее время к решению проблемы подтопления, является ряд статей Е. Сериковой с соавторами по управлению рисками подтопления на городских территориях [15, 16]. Данное направление является новым и перекликается с направленностью нашей работы, так как применение электроосмоса при защите от подтопления тоже имеет определённый риск.

Небольшой обзор опубликованных материалов создаёт необходимую дискуссионную базу для дальнейшего обсуждения представленной работы по теме применения аналогии фильтрации и электричества при моделировании защиты от подтопления в городском строительстве.

ОБСУЖДЕНИЕ

Методология комплексного расчёта и моделирования совместных процессов фильтрации воды в грунтах, протекания электрического тока и электроосмотической фильтрации может найти полезное применение при разработке эффективной защиты от подтопления в городском строительстве.

Следует сразу оговорить, что рассматриваемая в данной работе аналогия фильтрации и электричества, описанная в предыдущем разделе, не имеет ничего общего с методом ЭГДА, то есть с электрогидродинамической аналогией. Метод ЭГДА впервые предложил Н.Н. Павловский [5] для моделирования напорной фильтрации воды при гидротехническом строительстве плотин. Вначале в качестве проводящей среды для электрического тока использовали жидкие электролиты. Затем в качестве проводящей среды стали применять электропроводную графитовую бумагу. Методом ЭГДА с помощью электричества моделировали чистую фильтрацию воды по закону Дарси (1). В нашей работе, напротив, рассматриваем смешанную фильтрацию воды, удовлетворяющую двум феноменологическим законам (1) и (4).

Важность технологии электроосмоса для моделирования строительного водопонижения и дренажа подчеркнём на примере расчёта, насколько электроосмотическая фильтрация увеличивает расход воды в сравнении с обычной фильтрацией по закону Дарси, произведённого нами в [7]. Коэффициент электроосмотической отдачи суглинка при действии на грунт постоянного электрического тока оказался примерно в 5 раз больше, чем коэффициент гравитационной водоотдачи этого же грунта без применения электричества. Поэтому дебиты скважин при действии электроосмоса соответственно возрастут приблизительно в 5 раз.

У некоторых исследователей возникают сомнения по поводу экономической целесообразности применения электроосмоса для защиты от подтопления, особенно в области дорожного строительства. Тут следует разграничить. Действительно, при постоянном электроосмотическом водопонижении, особенно в полевых условиях на дорогах в отсутствие линий электропередач, использование, например, генераторов электрического тока, работающих за счёт двигателей внутреннего сгорания, будет не рентабельно. Однако, в другом случае городского строительства, например, при возведении высотных зданий и сооружений, применение электроосмоса не просто будет осушать грунт в процессе земляных работ, но также существенно укрепит стенки грунтовых выработок. Поэтому экономическим эффектом в данном случае может быть предотвращённая катастрофа от обрушения уникального здания или сооружения. Тогда применение электроосмоса для строительного водопонижения будет несомненно экономически оправдано.

Продолжим обсуждение методологии моделирования по теме работы.

Используя классический метод конечных разностей (МКР), рассмотренные подходы можно использовать в современных компьютерных технологиях. Первоначально рекомендуется проводить грубое моделирование в электронных таблицах на персональных компьютерах и мобильных телефонах [17]. Далее следует применить другой подход моделирования. Базируясь на первоначальных грубых моделях предыдущего шага, надо записать алгоритмы МКР на языке программирования. При этом дальнейшая работа распадается на два последовательных шага.

Первый алгоритмический шаг. Вначале программный код лучше создать на языке

программирования интерпретирующего типа. В качестве такого языка в последнее время широкое распространение получил Python. Выбор языка зависит от личных предпочтений и привычек. Например, автору данной статьи достаточно быстро и надёжно удавалось прорабатывать алгоритмы моделирования на языке-интерпретаторе Visual Basic for Application, абсолютно совместимому с электронными таблицами Microsoft Excel. Программа-интерпретатор позволит создать прототипы алгоритмов, опробовать их на ряде тестовых задач, привязанных к конкретной строительной площадке.

Второй алгоритмический шаг. Имея разработанный на первом шаге программный алгоритмический код МКР-модели, можно переписать алгоритмы на языке программирования компилирующего типа. Это позволит создать исполняемый файл модели, скорость работы которого будет на несколько порядков больше по сравнению с моделью-интерпретатором. Скомпилированная модель исследуемых процессов фильтрации и электроосмоса позволит существенно повысить надёжность проектирования защиты от подтопления. Измельчая геометрический шаг МКР-сеток, увеличиваем точность модели. При этом исполняемый файл модели будет просчитан быстро и эффективно. Это и есть преимущества языков программирования компилирующего типа. В настоящее время наиболее удобным и эффективным языком программирования для целей нашего моделирования является современный Фортран, который снабжён встроенными средствами задания матриц. Эти средства позволяют задавать пространственные матрицы геометрических МКР-сеток непосредственно, без кропотливого набора в коде вложенных алгоритмических циклов.

За рубежом большее распространение для моделирования задач, связанных с электроосмосом, получил метод конечных элементов (МКЭ). Характерные примеры этого метода предоставляет следующая обзорная статья [18], а также [19, 20, 21, 22]. Методология МКЭ требует от исследователя более усиленной подготовки по математическому анализу в сравнении с МКР. Оба метода дают возможность моделирования по тематике данной статьи, но их дальнейшее детальное обсуждение настолько обширно, что следует перенести его на последующие публикации.

Автор, по своим предпочтениям, рекомендует использовать МКР-модели, так как при их построении балансый принцип выражен бо-

лее очевидно, чем у МКЭ-моделей. При этом исследователь в ходе моделирования скважин обязательно столкнётся с проблемой точного задания напора в узле сетки (рисунок 2). Эту особенность рассмотрим детально. Данное исследование предпринято впервые в методологии МКР-моделирования.

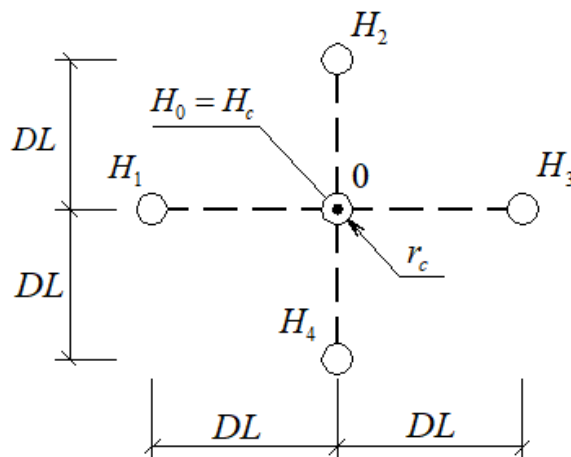


Рисунок 2 – Схема моделирования скважины в узле разностной сетки

Figure 2 – Scheme of well simulation at difference grid node
Источник: составлено автором
Source: compiled by the author

Для исследования принимаем наиболее распространённый случай двумерной квадратной МКР-сетки со сторонами квадрата DL. Предположим, что скважина радиусом r_c идеально попала в пересечение границ сетки в точке 0. Рисунок 2 надо представлять двояко.

Первым представлением рисунка 2 является гидрогеологический подход, когда рядом со скважиной по четырём сторонам света находятся 4 наблюдательных скважины-пьезометра в водоносном пласте с напорами соответственно H_1, H_2, H_3, H_4 . Тогда расход воды, притекающей к скважине по формуле Дюпюи можно записать в виде

$$Q_c = \frac{2\pi kM(H_K - H_c)}{\ln\left(\frac{DL}{r_c}\right)}, \quad (8)$$

где k – коэффициент фильтрации грунта; M – толщина обводнённого слоя грунта; остальные обозначения показаны на рисунке 2.

Здесь также введено выражение напора на контуре вокруг скважины

$$H_K = H_1 + H_2 + H_3 + H_4.$$

Вторым представлением рисунка 2 является конечно-разностный подход с учётом закона Дарси, согласно которому расход воды, притекающей к скважине, можно записать в виде

$$Q_c = kMDL \frac{H_1 - H_c}{DL} + kMDL \frac{H_2 - H_c}{DL} + kMDL \frac{H_3 - H_c}{DL} + kMDL \frac{H_4 - H_c}{DL} = 4kM(H_K - H_c). \quad (9)$$

Сопоставляя (8) и (9), выразим радиус скважины

$$r_c = DL \cdot \exp\left(\frac{-\pi}{2}\right). \quad (10)$$

Выражение (10) является точным. Его при моделировании удобно задавать программным путём либо с помощью функционала электронных таблиц. Для сравнения приведём хорошо известную приближённую зависимость, обычно используемую в практике гидрогеологического моделирования:

$$r_c = 0,2 \cdot DL.$$

Преимуществом выражения (10) является то, что оно не приводит к накоплению систематической ошибки около 5% в ходе моделирования в рамках рассматриваемой темы применения аналогии фильтрации и электричества при моделировании защиты от подтопления в городском строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-новому дано сравнение совместного применения средств строительного водопонижения разной физической сущности, при одновременных процессах гравитационной фильтрации подземной воды и пропускании постоянного электрического тока через осушаемый грунт, что вызывает дополнительный эффект электроосмоса. Предложено применять аналогию фильтрации воды и электрического тока с целью достижения более эффективных результатов инженерной деятельности путём защиты от подтопления территорий застройки, обеспечивая безопасность городского строительства при повышении уровня подземных вод. Записав закон Ома аналогично закону фильтрации Дарси, достигнуто лучшее понимание их аналогии. Это даёт возможность в перспективе дальнейших исследований развивать новые технологии для защиты от подтопления в городском строительстве, особенно электроосмотическое водопонижение и его моделирование. Методология моделирования

дополнена конкретными алгоритмическими шагами, позволяющими постепенно прорабатывать виртуальное отображение процессов фильтрации, происходящих на строительной площадке. В частности, предложено точно задавать напор в моделируемых скважинах. Представленные результаты исследований позволяют более эффективно осушать глинистые грунты, что обычно не удаётся стандартными методами водопонижения с использованием гравитационного водоотлива и дренажа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павилонский В.М. Метод определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов // Труды ин-та «ВОДГЕО». 1964. №7 С. 59–79.
2. Павилонский В.М. Исследование метода уплотнения на коэффициент фильтрации глинистых грунтов // Труды ин-та «ВОДГЕО». 1972. №35. С. 45–50.
3. Павилонский В.М. Противофильтрационные устройства накопителей отходов промышленных предприятий // Исследования хвостохранилищ и накопителей промстоков. 1982. С. 12–28.
4. Olsen H.W. Darcy's law in saturated kaolinite // Water Resources Res. – 1966, 2. – P. 287-296.
5. Павловский Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и её основные приложения: монография. Петроград: Изд-во Научно-мелиорационного института. 1922. 752 с.
6. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, 1972. 764 pp.
7. Сологаев В.И. Фильтрационные расчёты и моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: монография. Омск: СибАДИ. 2002. 416 с.
8. Кнаупе В. Устройство котлованов и водопонижение: монография / Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1988. 376 с.
9. Жинкин Г.Н. Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве: монография. – Л.-М.: Стройиздат. 1966. 196 с.
10. Сологаев В.И. О применении электроосмоса при защите от подтопления земель // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (27). С. 122–128.
11. Cánovas M., Valenzuela J., Romero L., González P. Characterization of electroosmotic drainage: Application to mine tailings and solid residues from leaching // Journal of Materials Research and Technology. Volume 9, Issue 3. Elsevier Editora Ltda, 2020, P. 2960-2968. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.046.
12. Massah J., Rahmani Fard M., Aghel H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction // Journal of Terramechanics. Volume 95. Elsevier Ltd, 2021, P. 1-6. DOI: 10.1016/j.jterra. 2021.01.003.
13. Zhou H.A, Fang Y.B, Chen M.C, Gu R.C, Li W.B. Experimental and analytical study on electro-

osmosis in low-permeability soil considering the pore size effect // *Geotechnique*. Volume 71. ICE Publishing, 2021. P. 141-152. DOI: 10.1680/jgeot.18.P.362.

14. Тихомолова К.П. Электроосмос: монография. Л.: Химия. 1989. 248 с.

15. Sierikova E., Strelnikova E., Pisia L., Pozdnyakova E. Flood risk management of Urban Territories // *Eco. Env. & Cons.* 26 (3) : 2020; pp. 1068-1077.

16. Sierikova E., Strelnikova E. Environmental safety of building development on the kharkiv city flooding areas example // *Noble International Journal of Scientific Research*. 3(8) : 2019; pp. 72-78.

17. Сологаев В.И., Золотарев Н.В. Моделирование радиальной фильтрации методом электронных таблиц на мобильных телефонах // *Омский научный вестник*. 2011. № 1 (97). С. 198–200.

18. Di Fraia S., Massarotti N., Nithiarasu P. Modelling electro-osmotic flow in porous media // *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 28 (2), 2018, pp. 472-497. DOI: 10.1108/hff-11-2016-0437.

19. Liang M., Yang S., Yu B. Analysis of electroosmotic characters in fractal porous media // *Chemical Engineering Science*. Volume 127, 4 May 2015, Pages 202-209. DOI:10.1016/J.CES.2015.01.030.

20. Cheema T.A., Kim K.W., etc. Numerical Investigation on Electroosmotic Flow in a Porous Channel // *The 1st IEEE/IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing*. 2013. Pp. 79-82. DOI:10.12792/ICISIP2013.019.

21. Chena S., Hea X., etc. Electro-osmosis of non-Newtonian fluids in porous media using lattice Poisson–Boltzmann method // *Journal of Colloid and Interface Science*. Volume 436, 15 December 2014. Pp. 186-193. DOI:10.1016/j.jcis.2014.08.048.

22. Cameselle C. Enhancement Of Electro-Osmotic Flow During The Electrokinetic Treatment Of A Contaminated Soil // *Electrochimica Acta*. Volume 181, 1 November 2015, pp. 31-38. DOI:10.1016/J.ELECTACTA.2015.02.191.

REFERENCES

1. Pavilonskiy V.M. Metod opredeleniya koeffitsiyenta fil'tratsii glinistykh gruntov [Method for determining the filtration coefficient of clay soils] // *Trudy in-ta «VODGEO»*, vyp. 7. – M.: VNII VODGEO, 1964: 59-79. (In Russian).

2. Pavilonskiy V.M. Issledovaniye metoda uplotneniya na koeffitsiyent fil'tratsii glinistykh gruntov [Investigation of the compaction method on the filtration coefficient of clay soils] // *Trudy in-ta «VODGEO»*, vyp. 35: *Gidrogeologiya*. – M.: VNII VODGEO, 1972: 45-50. (In Russian).

3. Pavilonskiy V.M. Protivofil'tracionnyye ustroystva nakopiteley otkhodov promyshlennykh predpriyatiy [Anti-filtration devices of waste storage facilities of industrial enterprises] // *Issledovaniya khvostokhranilishch i nakopiteley promstokov*. M.: VNII VODGEO, 1982: 12-28. (In Russian).

5. Pavlovskiy N.N. Teoriya dvizheniya gruntovykh vod pod gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami i yeyo osnovnyye prilozheniya: Monografiya. *Petrograd: Izd-vo Nauchno-melioratsionnogo instituta*, 1922. 752 s. (In Russian).

6. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, 1972. 764 pp.

7. Sologae V.I. Fil'tratsionnyye raschoty i modelirovaniye pri zashchite ot podtopleniya v gorodskom stroitel'stve [Filtration calculations and modeling for flood protection in urban construction: Monografiya. *Omsk: SibADI*, 2002: 416 (In Russian).

8. Knaupe V. Ustroystvo kotlovanov i vodoponizheniye [Construction of pits and water reduction]: Monografiya / Per. s nem. – M.: *Stroyizdat*, 1988. – 376 s. (In Russian).

9. Zhinkin G.N. Elektrokhimicheskoye zakrepleniye gruntov v stroitel'stve [Electrochemical fixing of soils in construction]: Monografiya. – L.-M.: *Stroyizdat*, 1966. – 196 s. (In Russian).

10. Sologae V.I. O primenenii elektroosmosa pri zashchite ot podtopleniya zemel' // *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – Omsk: OmGAU, 2017. – Vyp. 3 (27). – S. 122-128. (In Russian).

11. Cánovas M., Valenzuela J., Romero L., González P. Characterization of electroosmotic drainage: Application to mine tailings and solid residues from leaching // *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 9, Issue 3. Elsevier Editora Ltda, 2020, P. 2960-2968. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.046.

12. Massah J., Rahmani Fard M., Aghel H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction // *Journal of Terramechanics*. Volume 95. Elsevier Ltd, 2021, P. 1-6. DOI: 10.1016/j.jtterra. 2021.01.003.

13. Zhou H.A, Fang Y.B, Chen M.C, Gu R.C, Li W.B. Experimental and analytical study on electro-osmosis in low-permeability soil considering the pore size effect // *Geotechnique*. Volume 71. ICE Publishing, 2021. P. 141-152. DOI: 10.1680 / jgeot.18.P.362.

14. Tikhomolova K.P. Electroosmos: Monografiya. – L.: Chemistry, 1989. – 248 p.

15. Sierikova E, Strelnikova E., Pisia L., Pozdnyakova E. Flood risk management of Urban Territories // *Eco. Env. & Cons.* 26 (3): 2020; pp. 1068-1077.

16. Sierikova E., Strelnikova E. Environmental safety of building development on the kharkiv city flooding areas example // *Noble International Journal of Scientific Research*. 3 (8): 2019; pp. 72-78.

17. Sologae V.I., Zolotarev N.V. Modelirovaniye radial'noy fil'tratsii metodom elektronnykh tablits na mobil'nykh telefonakh [Modeling of radial filtering by the spreadsheet method on mobile phones] // *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2011. 1 (97):. 198-200. (In Russian).

18. Di Fraia S., Massarotti N., Nithiarasu P. Modelling electro-osmotic flow in porous media // *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 28 (2), 2018, pp. 472-497. DOI: 10.1108 / hff-11-2016-0437.

19. Liang M., Yang S., Yu B. Analysis of electroosmotic characters in fractal porous media // *Chemical*

Engineering Science. Volume 127, 4 May 2015, Pages 202-209. DOI: 10.1016 / J.CES.2015.01.030.

20. Cheema T.A., Kim K.W., etc. Numerical Investigation on Electroosmotic Flow in a Porous Channel // The 1st IEEE / IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing. 2013. Pp. 79-82. DOI: 10.12792 / ICISIP2013.019.

21. Chena S., Hea X., etc. Electro-osmosis of non-Newtonian fluids in porous media using lattice Poisson – Boltzmann method // Journal of Colloid and Interface Science. Volume 436, 15 December 2014. Pp. 186-193. DOI: 10.1016 / j.jcis.2014.08.048.

22. Cameselle C. Enhancement Of Electro-Osmotic Flow During The Electrokinetic Treatment Of A Contaminated Soil // Electrochimica Acta. Volume 181, 1 November 2015, pp. 31-38. DOI: 10.1016 / J.ELECTACTA.2015.02.191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сологаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «СибАДИ», проф. кафедры «ГСХН» ORCID 0000-0002-2553-9892 (644080, г. Омск, пр. Мира 5, sologaev_vi@cdo.sibadi.org).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valery I. Sologaev, Dr. of Sci., Professor of the Urban Construction, Management and Real Estate Expertise Department, ORCID 0000-0002-2553-9892 Siberian State Automobile and Highway University, 644080, Russia, Omsk, 5 Mira Avenue, sologaev_vi@cdo.sibadi.org.