

УДК 628.311

© В. Д. Кузьмин, студент

© В. П. Верхотуров, канд. техн. наук, доцент

© М. А. Саньков, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: Vkuzmin070@gmail.com, Wladw@mail.ru, maxsnkv@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-61-68

© V. D. Kuzmin, student

© V. P. Verkhoturov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© M. A. Sankov, post-graduate student

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: Vkuzmin070@gmail.com, Wladw@mail.ru, maxsnkv@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНФИЛЬТРАЦИИ ГРУНТОВЫХ ВОД В САМОТЕЧНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS CFX

MODELING OF THE GROUND WATER INFILTRATION PROCESS INTO SEWER PIPELINES USING THE ANSYS CFX SOFTWARE

Статья посвящена разработке моделей процессов фильтрации грунтовых вод в трубу с помощью программы ANSYS CFX. Используя метод конечных элементов, программа позволяет реализовать моделирование процесса фильтрации через щелевое отверстие в стенке трубопровода. Рассмотрены различные случаи расположения отверстия и притока грунтовых вод к нему, а также возможные варианты задания пористой среды грунта. Полученные модели дают возможность визуализировать процесс поступления грунтовых вод, оценить количественные показатели притока инфильтрационных вод в системе водоотведения, дать оценку скоростям и расходам фильтруемой жидкости.

Ключевые слова: ANSYS CFX, фильтрация жидкости, инфильтрационный расход, движение грунтовых вод.

The article is devoted to the development of models of groundwater infiltration processes into sewer pipelines using the ANSYS CFX program. Using the finite element method, the program allows implementing a simulation of the filtration process through a slit hole in the pipeline wall. Various cases of the location of the hole and the inflow of groundwater to it are regarded, as well as possible options for setting the porous domain. The models obtained make it possible to visualize the process of groundwater inflow, evaluate quantitative indicators of the inflow of infiltration waters into drainage systems, and assess the speeds and flow rates of the infiltrated liquid.

Keywords: ANSYS CFX, liquid filtration, infiltration flow, groundwater movement.

Введение

Инфильтрация — частный случай процесса фильтрации жидкости в пористой среде, в данном случае грунте. Под инфильтрацией понимается проникновение грунтовых вод в водоотводящие сети через неплотности стыков, трещины или различные повреждения трубопроводов и сооружений на них [7].

Моделирование процессов фильтрации с использованием различных расчетных комплексов все более часто встречается в практике проектирования инженерных сооружений. При этом могут использоваться различные подходы и алгоритмы, позволяющие учитывать те или иные особенности процессов и материалов.

Возможности ANSYS позволяют смоделировать процесс фильтрации для различных материалов, даже для вновь создаваемых. Один из возможных путей реализации такой задачи показан в работе [3]. Программа дает возможность исследовать и неоднородную в пространстве пористую среду для получения представлений о распределении фильтруемого потока жидкости в различных сечениях [10]. Фильтрация жидкости из трубопровода в грунт в качестве задачи для моделирования рассматривается в статье [2] и других работах, подобных этой, посвященных разным типам утечек из трубопроводов. В статьях [2, 5] показана возможность моделирования фильтрации с помощью модуля ANSYS Fluent, вычисления в котором производятся по методу конечных объемов, что несколько отлично от алгоритмов, реализуемых в комплексе ANSYS CFX, выбранного для данного моделирования.

Методы

Основопологающим для данной модели является процесс поступления грунтовых вод в самотечные трубопроводы под действием гидростатического давления (гидростатического напора). Целью проведенного моделирования является визуализация процесса фильтрации воды в грунте по осям координат при малой водоприемной способности трубы. Модель позволит оценить вертикальную составляющую процесса фильтрации, которую не учитывает основное уравнение поступления грунтовых вод в дренажную трубу, выведенное с учетом принятого допущения о параллельности потоков грунтовых вод [4]:

$$Q = \frac{K_{\text{фильтр}} \cdot H^2}{R}, \quad (1)$$

где Q — расход, поступающий в дренажную трубу при дренаже совершенного типа; $K_{\text{фильтр}}$ — коэффициент фильтрации, характеризующий грунт по водопропускной способности; H — гидростатический напор над

дренажной трубой; R — радиус депрессии (радиус влияния) дренажа.

Приведенная формула выведена таким образом, что учитывает только горизонтальную составляющую фильтрации (движение грунтовой воды принято параллельным оси y) [9].

Программный комплекс ANSYS CFX позволяет выполнить моделирование и анализ физических процессов с помощью метода конечных элементов (МКЭ) путем дискретизации расчетной области (моделируемого объекта) на множественные элементарные области, где конечный объем рассматривается как совокупность отдельных элементов [1]. Для реализации метода такого расчета в программу встроен модуль ANSYS CFX — Mesh, дающий возможность отследить генерацию расчетной сетки и размер ее ячеек (шаг сетки). Далее, имея множество дискретно непрерывных функций, каждая из которых определена на отдельно взятом элементе, их значения вычисляются программой в конечном числе узлов сетки [1]. Это позволяет найти значения различных физических величин в множестве точек с известными координатами моделируемой области.

В качестве расчетных зависимостей при работе с пористой средой (Porous Domain) в программу заложено следующее расчетное уравнение для области квадратичных сопротивлений¹:

$$\frac{dp}{dx_i} = -K_q |U| U_i, \quad (2)$$

где $\frac{dp}{dx_i}$ — перепад давления; K_q — коэффициент квадратичного сопротивления; U — скорость движения жидкости.

Так как в реализуемой задаче характер течения фильтруемой воды в основном будет близким к ламинарному, то для вычисления программой используется численное решение системы уравнений Навье — Стокса [6].

¹ ANSYS CFX tutorial. Canonsburg: Inc. Southpointe, 2010. Release 13.0.

Уравнение Навье — Стокса является основным уравнением для вязкой ньютоновской жидкости, находящейся в поле действия сил, в полной векторной форме записи имеющее вид [8]:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad div} \mathbf{v} + \mathbf{f}, \quad (3)$$

где \mathbf{v} — скорость движения жидкости; η — коэффициент динамической вязкости; ζ — коэффициент второй вязкости, характеризующий часть напряжений, связанных с изменением объема частицы среды; \mathbf{f} — массовые силы негравитационной природы.

В общем случае, когда вектор скорости направлен произвольно, уравнения движения вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости (баланса сил) в проекциях на оси координат (z, x, y соответственно) принимают следующий вид (это и является системой уравнений Навье — Стокса):

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial y} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \end{cases}. \quad (4)$$

Используя систему уравнений (4), программа определяет изменение вектора скорости жидкости в каждой точке пространства по координате во времени $\rho \frac{\partial v_z}{\partial t}$. Так как построение геометрической расчетной модели производится изначально с привязкой к координатам, то численное решение приведенной системы позволяет найти значения скоростей и давления в каждом расчетном узле сетки.

Результаты

Для проведения предварительных расчетов была построена геометрическая модель пласта водонасыщенного грунта толщиной 0,5 м, который является двухфазной средой,

Porous Domain (вода — твердая фракция). В грунте размещена труба диаметром 400 мм с щелевым отверстием шириной 25 мм вдоль всей трубы. Расчетная глубина заложения трубы принималась на 2,4 м ниже УГВ. Ключевым параметром, определяющим процесс инфильтрации, служит размер щелевого отверстия, номинальный диаметр трубы при этом не оказывает прямого влияния на протекание процесса. Параметр, характеризующий среду по водопрпускной способности в данной программе, — объемная пористость, которая для песков колеблется в районе 0,6. Поскольку коэффициент фильтрации жидкости, используемый в основных методиках расчета притока грунтовых вод к дренажам и дренам [4], напрямую зависит от пористости грунта, то в данном случае это лишь способ задания пористой среды в программе. Давление на входе в трубу и на УГВ принято атмосферным. Сила тяжести задана ускорением 9,8 Н/м, направленным по вертикальной оси.

Расчетная сетка имеет размеры ячеек 0,05×0,05 м (подробнее — на рис. 1). Время расчета принято 60 с, расчетный шаг (timestep) — 2 с. В качестве выводимых на экран результатов параметров задаем скорость фильтрации, векторы скорости и линии тока для отображения протекания процесса фильтрации. Оценить объем притока инфильтрационных вод позволяет функция Calculator, с помощью которой можно определить расход среды (Mass Flow) через плоскость, в данном случае расход воды через щель в трубопроводе. Результаты моделирования потоков приведены на рис. 2, 3.

Для более точных вычислений режимов движения и количественных характеристик инфильтрационных вод необходимо учитывать третью составляющую пористой среды грунта — воздух, которая в описанном моделировании не учитывалась, а также принять в расчет взаимодействие потока грунтовых вод со стенкой трубопровода. Чтобы учесть

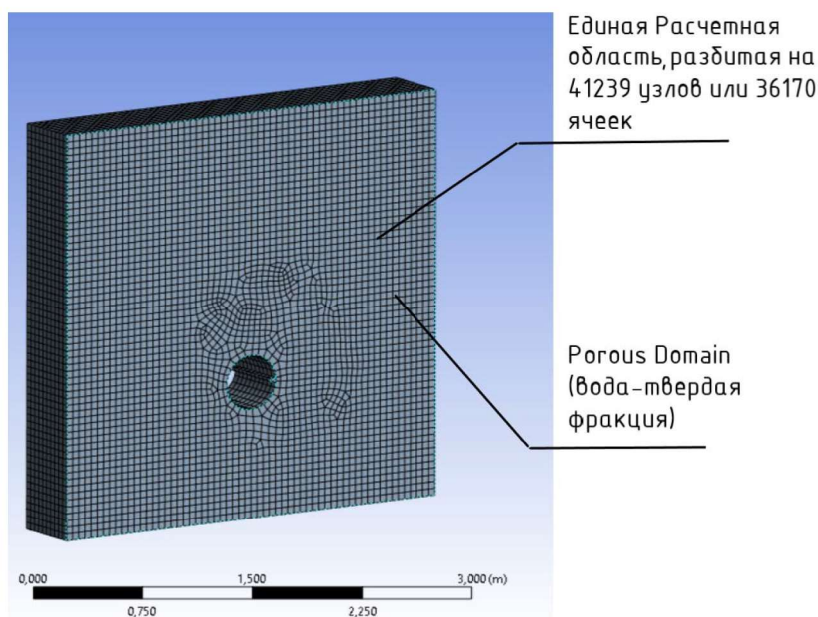


Рис. 1. Расчетная геометрия модели

эти факторы, была построена модель с воздушной составляющей грунта. В отличие от первой модели, где вся расчетная область — единый домен (Porous Domain), следующая модель разбита на четыре расчетных области с разными условиями (рис. 4): объем воздуха над поверхностью земли (Fluid Domain — воздух), объем воздуха в трубе (Fluid Domain — воздух), объем грунта (Porous Domain — твердое тело, вода), бетонная стенка трубы

(Solid Domain — твердое тело, бетон). Сама геометрия расчетной модели строится в программном модуле Space Claim, позволяющем работать со сложными по форме объемами. В грунте толщиной 200 мм на глубине 1,5 м от УГВ размещена труба диаметром 200 мм и толщиной стенки в 40 мм. Размеры щелевого отверстия в процессе моделирования были заданы следующими: 5, 15, 30, 40 мм. Размер расчетной сетки в области грунта — 0,05 м, в

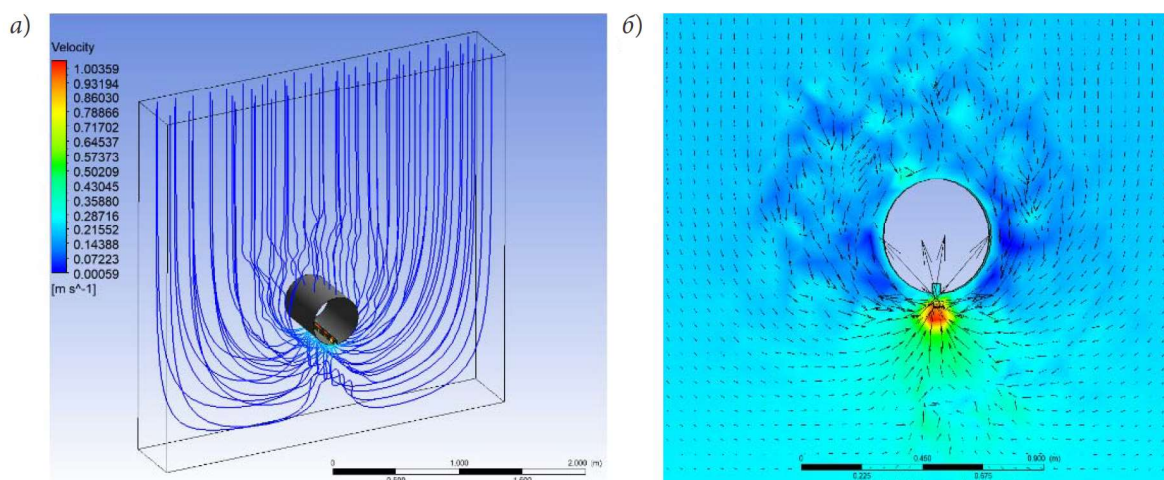


Рис. 2. Результаты моделирования с щелевым отверстием в нижней части:
 а — линии тока; б — векторное поле скоростей в области водоприемного отверстия

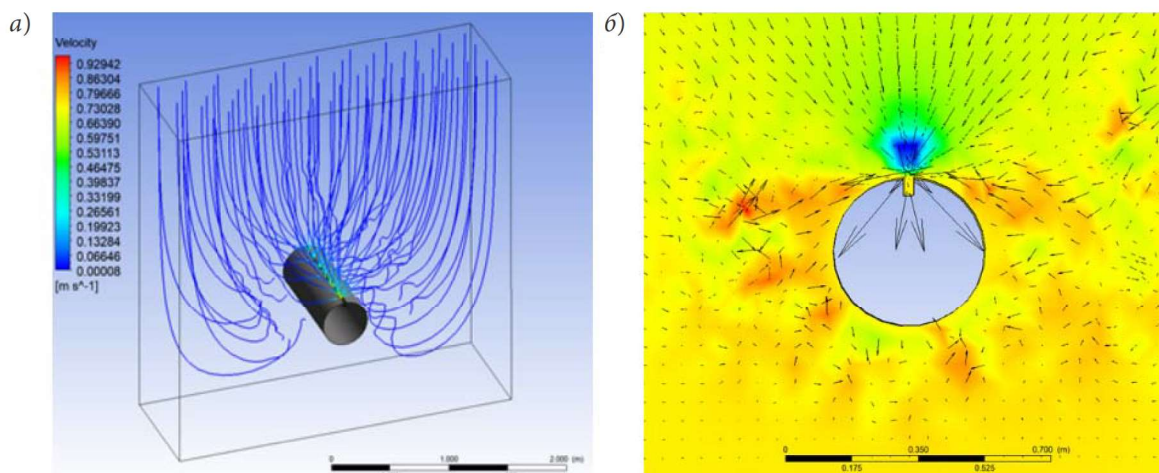


Рис. 3. Результаты моделирования с щелевым отверстием в верхней части: а — линии тока; б — векторное поле скоростей в области водоприемного отверстия

области трубы уменьшен до 0,01 м для более высокой точности моделирования, всего модель состоит из 25 240 расчетных узлов.

В этом случае параметры, характеризующие пористую изотропную среду, будут следующими: объемная пористость (Volume porosity), как и в первом случае, равна 0,6 и проницаемость (Permeability) для песков равна $1,2 \cdot 10^{-10}$. Свойства воздушной среды над УГВ и внутри трубы — воздух при 25 °С и нормальном атмосферном давлении. Время расчетного процесса, как и в первом случае, принято равным 60 с. Результаты моделирования потока с учетом воздушной составляющей приведены на рис. 5.

Обсуждение

Первая модель дает наглядное представление о направлении течения и скорости жидкости в процессе инфильтрации через щелевое отверстие.

Вторая модель позволяет оценить объем инфильтрационного стока, поступающего в трубу с щелевым отверстием, а также позволяет дать оценку скорости фильтрации. Высокие значения скоростей на рис. 3, а и 5, а обусловлены тем, что в местах стыковки областей с разными свойствами результаты вычислений могут быть некорректными.

Зависимость расхода, поступающего в трубу, от площади щелевого отверстия приводится на рис. 6.

Для верификации результатов, полученных при помощи расчетной модели, следует обратиться к приведенным в литературе методикам расчета. Для учета водоприемной способности труб дренажа был предложен ряд формул, изложенных в [11]. Рассматривая задачу притока к трубе в полярных координатах, А. И. Мурашко предложил поправку к формуле притока воды к скважине или дрене, учитывающую свойства водоприема щелевого отверстия [11]:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K_{\text{фильтр}} \cdot HL}{\ln \frac{4t}{D} + \ln \frac{2}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\tau}{D}\right)^2}}}, \quad (5)$$

где L — длина дрены; t — глубина от поверхности; τ — ширина щели; D — диаметр трубы.

Расчет по формуле показывает, что значения рассчитанного расхода, поступающего в трубу, отличаются от полученных в результате моделирования. Это говорит о том, что свойства смоделированного грунта не вполне соответствуют реальному. Однако общая

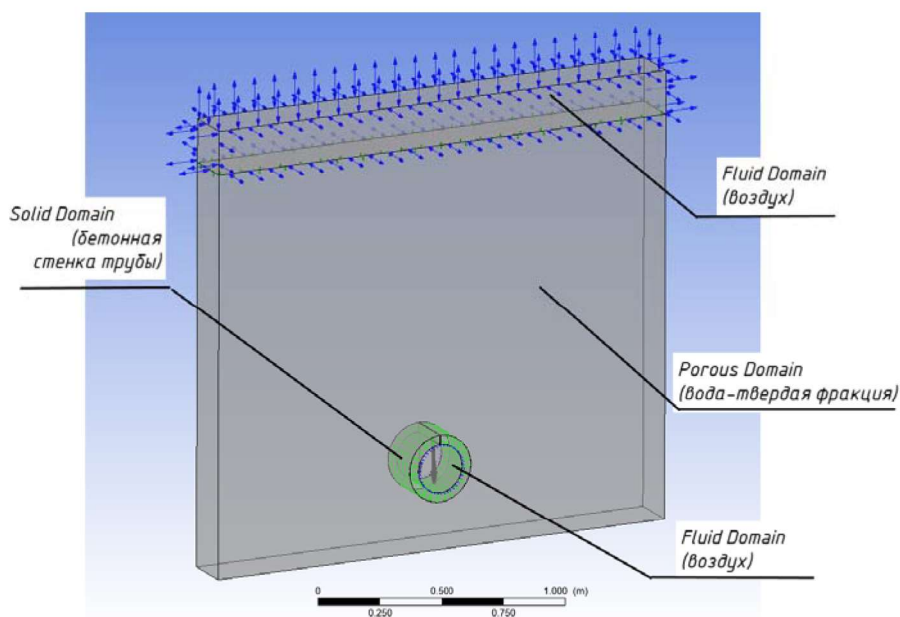


Рис. 4. Расчетные области модели, учитывающей воздушную составляющую грунта, в редакторе свойств программы (Setup)

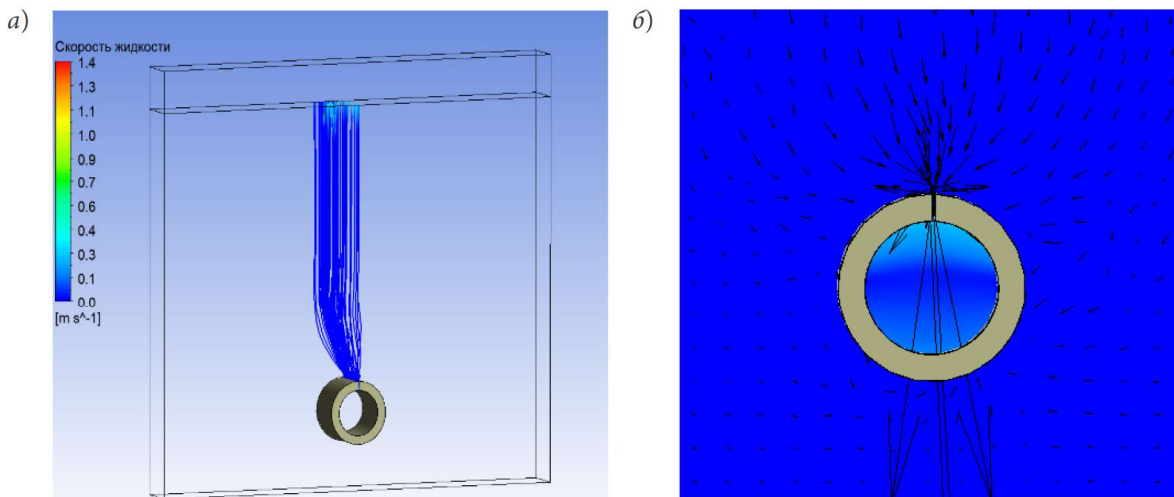


Рис. 5. Результаты моделирования, учитывающего воздушную составляющую грунта: а — линии тока, направленные к щелевому отверстию; б — векторное поле скоростей в области водоприемного отверстия

зависимость расхода от площади отверстий подтверждается согласно рис. 6.

Выводы

При фильтрации воды в грунте, если рассматривать малые отверстия и малую водоприемную способность трубы, следует учитывать вертикальную составляющую фильтрации, что подтверждается при рассмотрении векторов в полученной модели.

Допущения, принятые Дюпюи, о параллельности движения потоков грунтовых вод [9] мало применимы в случае точного расчета или математического описания поступления инфильтрационного стока в самотечные трубопроводы.

При моделировании пористой среды водонасыщенного грунта для получения более точных результатов необходимо задаваться

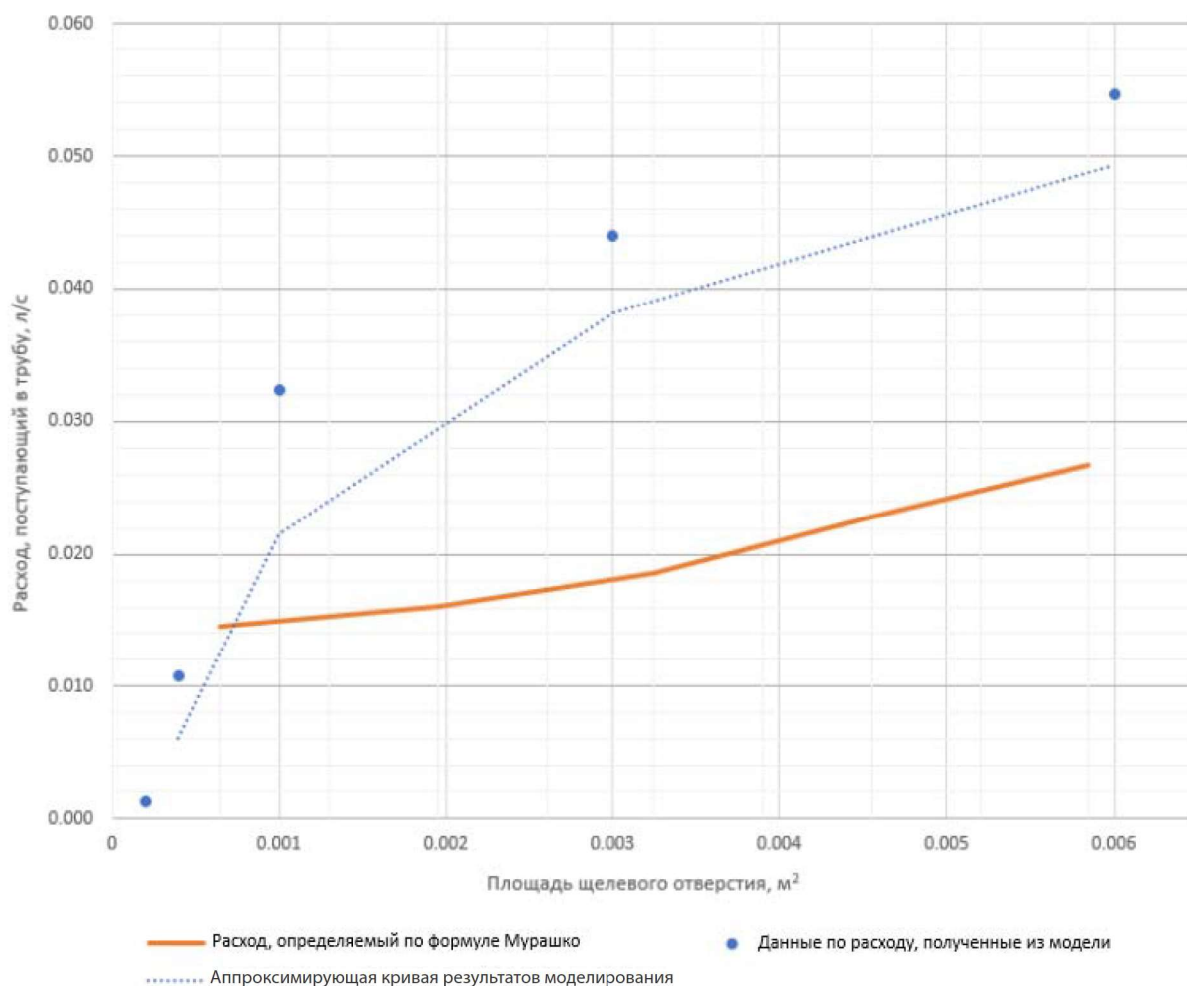


Рис. 6. График зависимости инфильтрационного расхода от площади щелевого отверстия

моделью, учитывающей три составляющие грунта: воздух, вода, твердая фракция.

Библиографический список

1. Сегерлинд Л. Дж. Применение метода конечных элементов / пер. с англ. А. А. Шестакова; под ред. Б. Е. Победри. М.: Мир, 1979. 392 с.
2. Жолобов В. В., Морецкий В. Ю., Талипов Р. Ф. Оценка величины утечки через сквозной дефект подземного трубопровода // V Всерос. науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт углеводородов», 28 октября 2022 г., Омск, Россия. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2022. С. 24–37.
3. Куликовский В. В., Киселев Н. В., Киселев М. В. Разработка новой структуры пористого материала с повышенной фильтрующей способностью // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 2 (386). С. 189–193.
4. Абрамов С. К. Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве. М.: Стройиздат, 1967. 239 с.
5. Sobieski W., Trykozko A. Darcy's and Forchheimer's laws in practice. Part 2. The numerical model // Technical Sciences. 2014. 17 (4). Pp. 337–350.
6. Батулин О. В., Колмакова Д. А., Матвеев В. Н., Попов Г. М., Шаблий Л. С. Расчет пространственной структуры потока в ступени осевого компрессора в программном комплексе ANSYS CFX. Самара: Изд-во Самарского гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 101 с.
7. Алексеев М. И., Верхотуров В. П., Кудрявцев А. В. Оценка объемов поступления инфильтрационных вод в централизованные системы водоотведения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 160–163.
8. Колесниченко В. И., Шарифулин А. Н. Введение в механику несжимаемой жидкости. Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. 127 с.

9. Тернов А. Ф. Гидравлика грунтовых вод. Томск: Изд-во Томского гос. архит.-строит. ун-та, 2010. 63 с.

10. Сираев Р. Р. Фильтрация жидкости в пористой среде Форцгеймера с пространственно неоднородными пористостью и проницаемостью // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12, № 3. С. 281–292.

11. Мурашко А. И. Горизонтальный пластмассовый дренаж. Минск: Ураджай, 1973. 207 с.

References

1. Segerlind L. Dzh. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Application of the finite element method]. Transl. from English by Shestakov A. A. Ed. by Pobedri B. E. Moscow, Mir Publ., 1979, 392 p.

2. Zholobov V. V., Moretskiy V. Yu., Talipov R. F. *Otsenka velichiny utechki cherez skvoznoy defekt podzemnogo truboprovoda* [Estimation of leakage value taking into account the through defect of underground pipeline]. *Trudy V Vseros. nauch.-prakt. konf. «Truboprovodniy transport uglevodorodov», 28 oktyabrya 2022 g., Omsk, Rossiya* [Proceedings of the V All-Russian conf. “Pipeline Hydrocarbons Transportation”, October 28, 2022, Omsk, Russia]. Omsk, Omskiy gos. tekhn. un-t Publ., 2022, pp. 24–37.

3. Kulikovskiy V. V., Kiselev N. V., Kiselev M. V. *Razrabotka novoy struktury poristogo materiala s povyshennoy fil'truyushchey sposobnost'yu* [Development of new structure of porous material with improved filtering ability]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Bulletin of Higher Schools. Technology of textile industry*, 2020, no. 2 (386), pp. 189–193.

4. Abramov S. K. *Podzemnye drenazhi v promyshlennom i gorodskom stroitel'stve* [Underground drainages in

industrial and urban construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1967, 239 p.

5. Sobieski W., Trykozko A. Darcy's and Forchheimer's laws in practice. Part 2. The numerical model. *Technical Sciences*, 2014, no. 17 (4), pp. 337–350.

6. Baturin O. V., Kolmakova D. A., Matveev V. N., Popov G. M., Shabliy L. S. *Raschet prostranstvennoy struktury potoka v stupeni osevogo kompressora v programmnom komplekse ANSYS CFX* [Calculation of the spatial flow structure in the axial compressor stage in the ANSYS CFX software package]. Samara, Samarskby gos. aerokosm. un-t Publ., 2011, 101 p.

7. Alekseev M. I., Verkhoturov V. P., Kudryavtsev A. V. *Otsenka ob'emov postupleniya infil'tratsionnykh vod v tsentralizovannye sistemy vodootvedeniya* [Estimation of infiltration water inflow volume into centralized water disposal systems]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 6 (83), pp. 160–163.

8. Kolesnichenko V. I., Sharifulin A. N. *Vvedenie v mekhaniku neszhimaemoy zhidkosti* [Introduction in mechanics of incompressible fluid]. Perm, Permskiy nats. issled. politekhn. un-t Publ., 2019, 127 p.

9. Ternov A. F. *Gidravlika gruntovykh vod* [Hydraulics of groundwater]. Tomsk, Tomskiy gos. arkhит.-stroit. un-t Publ., 2010, 63 p.

10. Siraev R. R. *Fil'tratsiya zhidkosti v poristoy srede Fortsgeymera s prostranstvenno neodnorodnymi poristost'yu i pronitsaemost'yu* [Filtration of fluid in porous Forchheimer medium with spatially heterogeneous porosity and permeability]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred – Computational mechanics of continuous media*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 281–292.

11. Murashko A. I. *Gorizonta'lniy plastmassoviy drenazh* [Horizontal plastic drainage]. Minsk, Uradzhay Publ., 1973, 207 p.