



Aleksey V. Naumuk
Наумук Олексій
Володимирович



Evgeniy G. Prokofiev
Прокоф'єв
Євгеній
Геннадійович



Yuriy A. Sitsylitsyn
Сіциліцин Юрій
Олександрович



Alyona V. Chorna
Чорна Альона
Віталіївна



Aleksandr S. Koreckiy
Корецький
Олександр
Сергійович

УДК 004.415:622.587

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR PREDICTING THE PRESSURE OF GROUNDWATER IN THE AREA OF UNDERGROUND STRUCTURES OF CYLINDRICAL FORM

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТИСКУ ҐРУНТОВИХ ВОД У ЗОНІ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

DOI 10.15589/SMI.2018.02.25

Aleksey V. Naumuk

О. В. Наумук, ст. викл.
naumuk@mdpu.org.ua
ORC ID: 0000-0002-3246-8260

Evgeniy G. Prokofiev

Є. Г. Прокоф'єв, ст. викл.
prokofiev@mdpu.org.ua
ORC ID: 0000-0002-7708-5802

Yuriy A. Sitsylitsyn

Ю. О. Сіциліцин, ст. викл.
yuriy@mdpu.org.ua
ORC ID: 0000-0002-3888-5575

Alyona V. Chorna

А. В. Чорна, асистент
alonachorna@gmail.com
ORC ID: 0000-0002-0062-1144

Aleksandr S. Koreckiy

О. С. Корецький, магістрант
dm-scorpio@mail.ru
ORC ID: 0000-0003-4707-2274

Melitopol State Pedagogical University named after Bogdan Khmelnytsky, Melitopol

*Мелітопольський державний педагогічний університет
імені Богдана Хмельницького, Мелітополь*

Abstract. The theoretical substantiation of the need to develop a software for predicting groundwater pressure on underground structures of cylindrical shape has been analyzed and reflected. In the course of the study, the process of developing a software for predicting groundwater pressure in the area of underground structures of a cylindrical shape was described. During the development of the algorithm of the future software, the basic chemical and physical characteristics of the soil were determined which should be taken into account when forecasting the pressure of groundwater, namely: the rate of filtration, the physical and chemical properties of the soil, the infiltration (raining, melting of the snow), the work of pressure from the reservoirs and other sources. Other factors are considered unimportant in forecasting. The stages of the process of developing a mathematical model of a software tool are shown. The basic soils, their physical properties, the level of porosity, the redistribution of pressure in the reservoir, the capillarity, etc. were analyzed. The work used to elucidate the used formulas for calculating the influence of groundwater on the physical features of different soils used in the development of a mathematical model of a software tool, modification of existing formulas was carried out, and a mathematical apparatus for predicting groundwater pressure in a zone of underground structures of a cylindrical shape, based on the Darcy formulas, Shhelkachyov, the main formula in the theory of elastic fluid filtration regime and others. The process of development of software for forecasting the impact of groundwater on underground structures of cylindrical shape and elements of the created software tool is revealed. The results of tests of the finished software on the example of prediction of groundwater pressure on the structure are presented in the model when calculating exact values of the used soil type. The results of the development are the basis for future developments and improve the accuracy of prediction of groundwater pressure in the area of underground structures of a cylindrical shape and can be used as a template for the future development of software for predicting groundwater pressure on underground structures.

Keywords: pressure; soil; construction; programming; algorithmization.

Анотація. Проаналізовано та відображено теоретичне обґрунтування потреби розробки програмного засобу прогнозування тиску ґрунтових вод на підземні споруди циліндричної форми. У ході дослідження був описаний процес розробки програмного засобу прогнозування тиску ґрунтових вод у зоні підземних споруд циліндричної форми. Під час розробки алгоритму майбутнього програмного засобу було визначено основні хімічні та фізичні характеристики ґрунтів, які доцільно враховувати під час прогнозування тиску ґрунтових вод: швидкість фільтрації, фізико-хімічні властивості ґрунту, інфільтраційне підживлення (дощі, танення снігу), робота тиску з водою та інших джерел. Інші фактори вважаються неважливими під час прогнозування. Наведено етапи процесу розробки математичної моделі програмного засобу. Проаналізовано основні ґрунти, їх фізичні властивості, рівень пористості, перерозподіл тиску в пласті, капілярність тощо. Подано використані формули розрахунку впливу ґрунтових вод на фізичні особливості різних ґрунтів, що застосовувалися під час розробки математичної моделі програмного засобу, проведено модифікацію наявних формул та розроблено математичний апарат прогнозування тиску ґрунтових вод у зоні підземних споруд циліндричної форми, який базується на формулах Дарсі, Щелкачова, основній формулі в теорії пружного режиму фільтрації рідини та ін. Розкрито процес розробки програмного засобу прогнозування впливу ґрунтових вод на підземні споруди циліндричної форми та елементи створеного програмного засобу. Відображено результати тестувань готового програмного засобу на прикладі прогнозування тиску ґрунтових вод на споруду за внесення до моделі розрахунку даних точних значень використаного типу ґрунту. Результати розробки є основою для майбутніх доробок та покращення точності прогнозування тиску ґрунтових вод у зоні підземних споруд циліндричної форми і можуть бути застосовані як шаблон майбутніх розробок програмних засобів прогнозування тиску ґрунтових вод на підземні споруди.

Ключові слова: тиск; ґрунт; будівництво; програмування; алгоритмування.

Аннотация. Проанализировано и отражено теоретическое обоснование необходимости разработки программного средства прогнозирования давления грунтовых вод на подземные сооружения цилиндрической формы. В ходе исследования был описан процесс разработки программного средства прогнозирования давления грунтовых вод в зоне подземных сооружений цилиндрической формы. При разработке алгоритма будущего программного средства были определены основные химические и физические характеристики грунтов, которые целесообразно учитывать при прогнозировании давления грунтовых вод: скорость фильтрации, физико-химические свойства грунта, инфильтрационная подкормка (дожди, таяние снега), работа давления из водоемов и других источников. Другие факторы считаются неважными при прогнозировании. Приведены этапы процесса разработки математической модели программного средства. Проанализированы основные грунты, их физические свойства, уровень пористости, перераспределение давления в пласте, капиллярность и тому подобное. Поданы использованные формулы расчета влияния грунтовых вод на физические особенности различных грунтов, которые применялись при разработке математической модели программного средства, проведено модификацию имеющихся формул и разработан математический аппарат прогнозирования давления грунтовых вод в зоне подземных сооружений цилиндрической формы, основанный на формулах Дарси, Щелкачёва, основной формуле в теории упругого режима фильтрации жидкости и др. Раскрыто процесс разработки программного средства прогнозирования влияния грунтовых вод на подземные сооружения цилиндрической формы и элементы созданного программного средства. Отражены результаты тестирования готового программного средства на примере прогнозирования давления грунтовых вод на сооружение за внесение в модель расчета данных точных значений использованного типа грунта. Результаты разработки являются основой для будущих доработок и улучшения точности прогнозирования давления грунтовых вод в зоне подземных сооружений цилиндрической формы и могут быть применены в качестве шаблона будущих разработок программных средств прогнозирования давления грунтовых вод на подземные сооружения.

Ключевые слова: давление; ґрунт; строительство; программирование; алгоритмирование.

References

- [1] Makovetskiy, O. A. (2018). Otsenka vliyaniya podtopleniya gorodskikh territoriy na izmeneniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika* [Assessment of the impact of flooding of urban areas on changes in the physical and mechanical properties of soils. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanism*], 1. 148–159.
- [2] Makovetskiy, O., & Zuev, S. (2016). Practice device artificial improvement basis of soil technologies jet grouting. *Procedia Engineering*, 165. 504-509.
- [3] Six, J., Camerata, J., Bevan, J., Greer, P., & White, J. (2015). *Hydraulics. Arizona*: Technical Learning College.

- [4] Kurbatov, V. L., & Kondarkov, I. M. (2015) Opusknyye sooruzheniya. *Effektivnyye stroitel'nyye kompozity* : sb. nauch.-prakt. konf. k 85-letiyu zasluzh. deyat. nauki RF, akademika RAASN, doc. tekhn. n. YU. M. Bazhenova [Draft facilities. Efficient construction composites: Sat. scientific-practical Conf. to the 85th anniversary deserved. activities Science of the Russian Federation, Academician of RAACS, Dr. those. n Yu. M. Bazhenov]. Belgorod, 1–6.
- [5] *Proyektirovaniye elektrokhimicheskoy obrabotki gruntov. Koeffitsiyent fil'tratsii glinistykh gruntov* [Design of electrochemical treatment of soils. Filtration coefficient of clay soils]. Retrieved from: <http://www.groont.ru/electro/projecting/12.html>.
- [6] Basniyev, K., Dmitriyev, N., Kanevskaya, R., & Maksimov, V. (2006) *Podzemnaya gidromekhanika. 2-ye izdaniye* [Underground fluid mechanics. 2nd edition]. M.: Institute of Computer Research.
- [7] Kryetov, V., & Malyshev, V. (2015) *Tekhnichna termodynamika ta teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. Kiev: Ed. University "Ukraine".
- [8] *Uprugost' i plastichnost' gornykh porod* [Elasticity and plasticity of rocks]. Retrieved from: <http://www.drillings.ru/uprugost>.
- [9] Ponomarev, A. B., Makovetsky, O. A., & Savinov, A. V. (2003) Problemy inzhenernoy zashchity gorodskikh territoriy ot podtopleniya. Rekonstruktsiya istoricheskikh gorodov i geotekhnicheskoye stroitvo [Problems of engineering protection of urban areas from flooding. Reconstruction of historic cities and geotechnical construction]: *tr. international conf. on geotechnics*. — M.: ACB, t. 2.
- [10] Xiangfu, Chen. (2011) *Settlement Calculation on High-Rise Buildings*. Springer, 450 p.

Постановка задачі. Сучасний світ характеризується великою кількістю постійних змін, які супроводжують людство у всіх питаннях навколишнього світу. Однією з провідних проблем є проблема глобального потепління та збільшення рівня світового океану, яке, у свою чергу, призводить до збільшення кількості вологи у ґрунтах середньоконтинентальних ареалів. Глобальне потепління буде відчуватися не тільки через багато десятиліть, це відбувається вже сьогодні. До основних видів його впливу належать такі: збільшення екстремальних погодних явищ; підвищення рівня моря; зникнення льодовиків та полярного льоду; пошкодження коралів; зміни у дикій природі; погіршення здоров'я людей, зокрема велика кількість векторів захворювань. Незважаючи на те, що прямий зв'язок із глобальним потеплінням важко встановити для деяких із цих явищ окремо, безліч змін разом чітко свідчать про зростаючу небезпеку глобального потепління для економіки, здоров'я людей та екосистем, від яких люди й інші види залежать. Згідно з наявними даними, глобальне потепління збільшило інтенсивність опадів протягом останніх десятиліть. Наприклад, у грудні 1999 року Венесуела побачила найбільші місячні опади впродовж 100 років, масові зсуви та повені, внаслідок яких загинули близько 30 000 осіб. Протягом двох днів у місті Маектія дощі випали з інтенсивністю, яка звичайно спостерігалася лише раз на 1 000 років. Усі ці процеси мають катастрофічні наслідки, які важко спрогнозувати без похибок, а беручи до уваги постійну зміну середовища, похибка зростає з кожним роком у значній прогресії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У різні часи вивченням ґрунтових вод та їх впливу на щільність ґрунту займалися багато вчених, серед яких М. І. Кузьмін, Є. Б. Карабанов, С. М. Фотієв,

В. М. Максимов, А. М. Овчинников, В. М. Пономарьов, В. В. Шепелев та багато інших.

У наш час глобального перенаселення все частіше постають питання заселення малозаселених територій, їх забудівництва та розростання. Постійне перенаселення регіонів призводить до необхідності перебудови будівель у напрямку вертикалі, тобто добудівництва багатоповерхових будівель як над шаром землі, так і під ним. Розрахунок тиску ґрунтів та ґрунтових вод на ці споруди займає велику кількість часу та несе велику небезпеку життям людей при допущенні помилок у розрахунках, тому ми вважаємо актуальною тему розробки програми для прогнозування тиску ґрунтових вод у зоні підземних споруд на прикладі споруд циліндричної форми.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ — розробка програми для прогнозування тиску ґрунтових вод у зоні підземних споруд циліндричної форми.

Основний матеріал. Вплив підземних вод на підземні частини будівельних споруд може призвести до тяжких наслідків. Підтоплення будівель викликає зміну властивостей матеріалів, а в деяких випадках тиск води у водоносних шарах призводить до деформації і руйнування конструкцій. Тому вивчення розподілу тиску води в зоні підземних споруд має практичний інтерес. Вихідні дані для проведення прогнозів відрізняються великим спектром [1, с. 153–154], [2, с. 507], що ускладнює проведення теоретичного аналізу. Проте розробка математичних моделей на основі формули Дарсі [3] може значною мірою полегшити прогнозування ситуації, пов'язаної з можливістю руйнування будівельних об'єктів за наявності ґрунтових вод. Зазвичай ґрунтові води розташовані в першому водоносному горизонті [4]. Міжпластові води перебувають між двома шарами, нижче від інших підземних вод.

Тиск, що викликається підземними водами, визначається швидкістю фільтрації і залежить від фізико-хімічних властивостей ґрунту, інфільтраційного підживлення (дощі, танення снігу), роботи тиску з водою та інших факторів.

Рух рідини в пористих ґрунтах відбувається під дією капілярних сил або сил механічної природи. Розрізняють три види пір: сверхкапілярні (більше 500 мкм), капілярні (0,2...500 мкм) і субкапілярні (менше 0,2 мкм) [1, с. 155]. У капілярних порах рух рідини визначається силами молекулярного зчеплення. Субкапілярні пори характерні для глинистих порід, фільтрація води в них практично неможлива. Оціночні величини пористості в різних ґрунтах наведено в табл. 1 [2].

Швидкість фільтрації рідини прийнято визначати за допомогою формули Дарсі [3]

$$w = -k_{\phi} \frac{dH}{dx}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

де k_{ϕ} — коефіцієнт фільтрації, який дорівнює швидкості фільтрації в м/с, виміряної для одиничного градієнта напору води $dH/dx = 1$.

При дослідженні водопроникності ґрунтів частіше використовується аналог формули (1), коли швидкість потоку рідини зв'язується з градієнтом тиску [3]:

$$w = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx}, \quad (2)$$

де k — коефіцієнт проникності, м^2 , μ — коефіцієнт динамічної в'язкості рідини в Па·с.

Тиск p викликається висотою водяного стовпа H і дорівнює добутку густини води ρ на прискорення сили тяжіння g , тому зв'язок між коефіцієнтами фільтрації та проникності можна виявити з урахуванням виразів (1) і (2):

$$k = k_{\phi} \mu / \rho g. \quad (3)$$

На практиці часто застосовують кінематичну в'язкість рідини $\eta = \mu/\rho$, де ρ — густина рідини, кг/м^3 , коефіцієнт η вимірюється в одиницях $\text{м}^2/\text{с}$.

Водопроникні ґрунти складаються з великоуламкових порід, галечника, гравію, пісків, тріщинуватих порід та інших. До водонепроникних ґрунтів належать масивнокристалічні породи (граніт, мармур) і щільні глини, до напівпроникних порід — глинисті піски, пухкі пісковики, пухкі мергелі тощо. Величина коефіцієнта фільтрації k_{ϕ} різних ґрунтів [5] наведена в табл. 2.

Формули (1)–(3) є теоретичною основою для дослідження перенесення рідини в пористих ґрунтах [6–8]. Згідно з даними табл. 1 і 2, фізико-хімічні властивості ґрунтів змінюються на кілька порядків, що зумовлює зміну швидкості фільтрації води в широкому діапазоні.

Розглянемо рух води у водоносному ґрунтовому шарі товщиною h , коли швидкість фільтрації описується формулою (2). Рівняння швидкості перерозподілу тиску в пласті має вигляд [6]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \Delta p(x, y, z), \quad (4)$$

де χ — коефіцієнт провідності тиску, іноді називається коефіцієнтом п'єзопровідності, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для визначення коефіцієнта п'єзопровідності використовують формулу Щелкачова [9]

$$\chi = \frac{k}{\mu(m\beta_e + \beta_{\text{гр}})} = \frac{k_{\phi}}{\rho g(m\beta_b + \beta_{\text{гр}})}, \quad (5)$$

де m — пористість; β_b — коефіцієнт об'ємного стиснення води; $\beta_{\text{гр}}$ — коефіцієнт об'ємного стиснення твердої частини ґрунту, $1/\text{Па}$.

Оскільки значення $\beta_b = 4,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{н}$ [7], а $\beta_{\text{гр}} = 10^{-11} \dots 10^{-12} \text{ м}^2/\text{н}$ [8], то формулу (5) можна спростити:

$$\chi = \frac{k}{\mu m \beta_b} = \frac{k_{\phi}}{\rho g m \beta_b}. \quad (6)$$

Коефіцієнти п'єзопровідності ґрунтів χ , обчислені за формулою (6) для $\beta_b = 4,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{н}$ [7] з урахуванням даних табл. 2, наведені в табл. 3.

У плоско-радіальному випадку, коли тиск залежить тільки від радіуса, рівняння (4) набуває вигляду

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right). \quad (7)$$

Припустимо, що при $r = 0$ з водоносного шару завтовшки h є місце стік дебітом D . Точне розв'язання (7) для початкових і граничних умов:

$$\begin{aligned} p(r, 0) &= P_0 = h\rho g = \text{const}; \\ p(\infty, t) &= P_0 = h\rho g = \text{const}; \\ D &= \text{const}, t > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Таблиця 1. Величина пористості в різних ґрунтах

Назва ґрунту	Пористість, %
Глина	6,0...50,0
Глинисті сланці	0,54...1,40
Пісок	6,0...52,0
Пісчаник	13,0...29,0
Вапняк	До 33
Доломіти	До 39

Таблиця 2. Значення k_{ϕ} для різних ґрунтів [4]

Тип ґрунту	Пісок	Супіски	Суглинок	Глина
k_{ϕ} , м/с	$10^{-6} \dots 10^{-3}$	$10^{-8} \dots 10^{-5}$	$10^{-10} \dots 10^{-7}$	$10^{-11} \dots 10^{-9}$

Таблиця 3. Коефіцієнт χ різних ґрунтів

Тип ґрунту	Пісок	Супіски	Суглинок	Глина
Пористість, %	30	25	20	10
χ , $\text{м}^2/\text{с}$	$10^2 \dots 10^5$	$10^{-1} \dots 10^3$	$10^{-2} \dots 10$	$10^{-3} \dots 10^{-1}$

наводиться в роботі [5]:

$$p(r, t) = P_0 \left[1 - \frac{D\rho g}{4\pi h P_0 k_\phi} \int_z^\infty \frac{e^{-\alpha} d\alpha}{\alpha} \right], \quad (9)$$

де $z = r^2/(4\chi t)$.

Вираз (9) називається основною формулою в теорії пружного режиму фільтрації рідини [9]. Він може бути записаний у вигляді

$$p(r, t) = P_0 \left\{ 1 - \frac{D\rho g}{4\pi h P_0 k_\phi} [-E_i(-z)] \right\}, \quad (10)$$

де $-E_i(-z)$ — інтегральна показова функція:

$$-E_i(-z) = -\ln z - 0,5772 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} z^n. \quad (11)$$

Частинна похідна функції (10) по радіусу з урахуванням (11)

$$\frac{\partial p(r, t)}{\partial r} = \frac{D\rho g}{2\pi h k_\phi r} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} z^n \right]. \quad (12)$$

Підставляючи вираз (12) у формулу (2), отримаємо швидкість фільтрації води в точці $r > 0$

$$w = -\frac{D}{2\pi h r} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} z^n \right]. \quad (13)$$

Розв'язок (10) справедливий для умов (8) за наявності стоку D у точці $r = 0$. Використовуємо цей розв'язок для дослідження розподілу тиску в околиці труби кінцевого радіуса R [10].

Умови завдання напишемо у вигляді

$$\begin{aligned} p(r, 0) &= P_0 = h\rho g = \text{const}; \\ p(\infty, t) &= P_0 = h\rho g = \text{const} \text{ при } r > R. \end{aligned} \quad (14)$$

Припустимо, що на зовнішній поверхні труби радіусом R заданий потік визначається формулою (12), тобто має місце наступна гранична умова:

$$\frac{\partial p(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{D\rho g}{2\pi h k_\phi R} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} b^n \right], \quad (15)$$

де $b = R^2/4t$.

У цьому випадку розв'язком рівняння (7) з граничними умовами (14) і (15) для труби радіусом R буде функція (10). Зокрема, тимчасова залежність тиску на поверхні труби визначиться формулою

$$\begin{aligned} p(R, t) &= \\ &= P_0 \left\{ 1 + \frac{D\rho g}{4\pi h P_0 k_\phi} \left[\ln b + 0,5772 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} b^n \right] \right\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Вираз (16) зручно записати в безрозмірному вигляді

$$q(a, b) = 1 + a \left[\ln b + 0,5772 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} b^n \right], \quad (17)$$

де

$$q(a, b) = p(R, t)/P_0; \quad a = D/4\pi h^2 k_\phi; \quad b = R^2/4\chi t. \quad (18)$$

При $b \ll 1$ степеневий ряд у (16) швидко сходиться і тимчасова залежність тиску (17) спрощується:

$$q(a, b) = 1 + a(\ln b + 0,5772). \quad (19)$$

З формул (17) і (19) випливає, що тиск на поверхні труби із часом зменшується і при деякій величині $t = t_{\max}$ дорівнюватиме нулю. Подальше збільшення часу призводить до появи негативного тиску, що позбавлене фізичного змісту. Отже, справедливість рішень (17) і (19) обмежена інтервалом часу:

$$t < t_{\max}. \quad (20)$$

Максимальному значенню часу t_{\max} відповідає мінімальна величина $b_{\min} = R^2/4\chi t_{\max}$, для знаходження t_{\max} і b_{\min} прирівняємо праву частину виразу (17) нулю:

$$1 + a \left[\ln b_{\min} + 0,5772 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} b_{\min}^n \right] = 0. \quad (21)$$

Числовий розв'язок алгебраїчного рівняння (21) дозволяє знайти b_{\min} та t_{\max} . Якщо b достатньо мало, то для визначення $t = t_{\max}$ можна скористатися наближеною формулою (19), звідки випливає, що нульовий тиск досягається при виконанні умови $1 + a(\ln b_{\min} + 0,5772) = 0$. Розв'язання цього рівняння дає

$$b_{\min} = \exp\left(-0,5772 - \frac{1}{a}\right). \quad (22)$$

Формули (16)–(22) дозволяють розрахувати основні параметри, що визначають тиск ґрунтових вод на поверхні підземної споруди циліндричної форми.

Розробка програми включала у себе кілька етапів:

1. Обробка інформаційних джерел за фізико-хімічними та фільтраційними властивостями пористих ґрунтів.
2. Розробка алгоритму розрахунку основних параметрів, що визначають тиск ґрунтових вод на підземні споруди з використанням формул (16)–(22).
3. Створення функцій, необхідних для отримання числових даних.
4. Розробка структури таблиць, що відображають результати обчислень.
5. Перевірка коректності виконання алгоритму.
6. Складання інструкції користувачеві при використанні програми.

Відповідно до поставленого завдання програмний продукт повинен забезпечувати виконання розрахунків тиску ґрунтових вод залежно від фільтраційних властивостей ґрунту і характеристик підземної споруди. Код містив певні функції:

1. Функція Data_input () забезпечує введення вихідних даних.
2. Функція Data_output () забезпечує висновок вихідних даних.

3. Функція Pas (double u, double v) з використанням точної формули (16) визначає величину тиску ґрунтових вод на підземну споруду залежно від безрозмірних параметрів, які містять в собі більшість вхідних факторів.

4. Функція $Pas_correct$ (double u, double v) розраховує безрозмірний тиск залежно від параметрів з використанням точної формули (16).

5. Функція $Pas_uncorrect$ (double u, double v) визначає наближене значення безрозмірного тиску залежно від безрозмірних параметрів з використанням формули (19).

6. Функція B_{min} (double u) показує залежність b_{min} , t_{max} та a .

Створена програма повністю забезпечує функціонування всіх етапів алгоритму розв'язання задачі: вибір користувачем вихідних даних для проведення аналізу тиску ґрунтових вод на підземну споруду циліндричної форми; визначення залежності безрозмірного тиску $q(a, b)$ від параметрів a і b відповідно до точної формули (17); обчислення залежності тиску $q(a, b)$ від параметрів a і b відповідно до наближеної формули (19); розрахунок залежності параметра b_{min} від параметра a за формулами (21) і (22); висновок результатів обчислень на дисплеї.

Приклад залежності безрозмірного тиску ґрунтових вод $q(a, b)$ від параметрів a і b , розрахованої за формулою (17), наведено в табл. 4.

Результати розрахунку за наближеною формулою (19) у разі вихідних даних, які використовувалися при заповненні табл. 4, подані в табл. 5.

Згідно з даними, наведеними в табл. 4 і 5, результати розрахунку тиску за наближеною формулою (19) при $a \leq 0,12$ відрізняються від розрахунків за точною формулою (17) менше ніж на 4 %, тому при проведенні оціночних розрахунків можна обмежитися використанням простої формули (19). Параметр b_{min} відіграє велику роль. Він визначає межі адекватності математичної моделі: при $b > b_{min}$ задача не має розв'язку. Залежність параметра b_{min} від параметра a , яка знайдена за формулами (21) і (22), наведена в табл. 6.

Значення визначені відповідно за формулами (21) і (22): рядок 1 — параметр a ; рядок 2 — точне значення b_{min} ; рядок 3 — наближене значення b_{min} .

Таблиця 6 дозволяє провести оцінку значень b_{min} залежно від параметра a в інтервалі $a \leq 1,00$, а також визначити відповідний тиск при використанні формули (17) для $b = b_{min}$. З табл. 6 видно, що параметри b_{min} , обчислені за точною формулою (21), а параметри b_{min} , розраховані з використанням наближеного виразу (22), збігаються до третього знака після коми в інтервалі значень $a \leq 0,5$. З підвищенням a розбіжність у розрахунках зростає і при $a > 10$ складає більше 10 %.

Як приклад проведемо аналіз зміни тиску на поверхні циліндричної підземної споруди для наступних вихідних даних: радіус підземної споруди

ди 5 м; тип ґрунту — пісок або супісок з пористістю 20%; товщина водоносного шару 5 м; коефіцієнт фільтрації ґрунту 10^{-5} м/с; коефіцієнт п'єзопровідності $10,4$ м²/с; швидкість відкачування води $D = 10^{-3}$ м³/с; множник у формулі (16) $P_0 = 49050$ Па. Відповідно до наведених даних значення параметра $a = D/4\pi h^2 k_f$ приймалося рівним 0,06366. Результати обчислень за точною формулою (16) наведені в табл. 7.

Тиск ґрунтових вод на нижню частину підземного спорудження за вибраних параметрів дорівнює $P_0 = 49050$ Па. Вмикання насоса, що забезпечує швидкість відкачування води, дорівнює 10^{-3} м³/с, тиск знижується через 1974 години до 1,0 Па.

Для отримання інформації про залежність тиску ґрунтових вод на підземну споруду від безрозмірних параметрів, які містять у собі більшість вхідних факторів (радіус споруди, швидкість відкачування води, час, коефіцієнт пористості ґрунту, коефіцієнт фільтрації ґрунту, коефіцієнт п'єзопровідності, товщина водоносного шару, в м, тощо), з використанням точної формули (16) ініціюють роботу функції $Pas_correct$ (double u, double v). На дисплеї висвічується інформація типу, наведеного на рис. 1.

Таблиця 4. Залежність безрозмірного тиску $q(a, b)$ від параметрів

a/b	0,35	0,05	0,007	0,001	0,00014
0,030	0,995	0,929	0,869	0,810	0,751
0,060	0,991	0,858	0,737	0,620	0,502
0,090	0,986	0,787	0,606	0,430	0,253
0,120	0,982	0,716	0,475	0,240	0,0044

Таблиця 5. Залежність тиску $q(a, b)$ від параметрів a і b відповідно до наближеної формули (19)

a/b	0,35	0,05	0,007	0,001	0,00014
0,030	0,986	0,927	0,868	0,810	0,751
0,060	0,972	0,855	0,737	0,620	0,502
0,090	0,957	0,782	0,605	0,430	0,253
0,120	0,943	0,710	0,474	0,240	0,0044

Таблиця 6. Залежність b_{min} від a

a	0,03	0,04	0,05	0,08	x	0,50	1,00
$\lg(b_{min})$, формула (21):	-14,73	-11,11	-8,94	-5,68	-3,15	-1,15	-0,76
$\lg(b_{min})$, формула(22):	-14,73	-11,11	-8,94	-5,68	-3,15	-1,12	-0,68
$\lg(p(b_{min}))$:	< -5	< -5	< -5	< -5	-5,7	-4,6	-4,0

Таблиця 7. Тимчасова залежність тиску на поверхні підземної споруди циліндричної форми

t :	0,0004	3,3400	33,4000	167,000	1973,9953
P_a :	49000	20000	13000	7700	1,0

Зависимость безразмерного давления $q(a,b)$ от параметров a и b
в соответствие с точной формулой (18)
Первая строка - параметр b , столбец слева - параметр a

	0.35000	0.05000	0.00700	0.00100	0.00014
0.03	0.99	0.93	0.87	0.81	0.75
0.06	0.97	0.85	0.74	0.62	0.50
0.09	0.96	0.78	0.61	0.43	0.25
0.12	0.94	0.71	0.47	0.24	0.00

Рис. 1. Відображення результатів розрахунку залежності тиску ґрунтових вод на підземну споруду від безрозмірних параметрів

За необхідності можна отримати дані про залежність безрозмірного тиску від параметрів a і b з використанням наближеної формули (19), що забезпечується ініціюванням функції *Pas_uncorrect* (*double u, double v*), величини тиску в паскалях, функцію *Pas* (*double u, double v*) і залежного параметра b_{\min} від параметра a за точною (21) і наближеною (22) формулами, функція B_{\min} (*double u*).

ВИСНОВКИ. У роботі було розкрито теоретичну основу розрахунку тиску ґрунтових вод на підземні основи, було визначено, що для розробки алгоритму доцільно використовувати формулу Дарсі. Після чого було вибрано основні характеристики ґрунтів, які доцільно враховувати при прогнозуванні тиску

ґрунтових вод: швидкість фільтрації, фізико-хімічні властивості ґрунту, інфільтраційне підживлення (дощі, танення снігу), робота тиску з водою та інші фактори. Обрані методи розробки та проектування дозволили розробити математичний алгоритм розрахунку, після чого реалізовано програмний засіб для прогнозування тиску ґрунтових вод у зоні підземних споруд циліндричної форми.

У подальшій роботі планується доробка та розвиток програмного засобу з метою розширення його функціоналу та зменшення рівня похибки для більш точного відображення результатів прогнозування в умовах постійної зміни навколишнього середовища.

Список літератури

- [1] Маковецкий, О. А. (2018). Оценка влияния подтопления городских территорий на изменение физико-механических свойств грунтов. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*, 1, 148–159.
- [2] Makovetskiy, O., & Zuev, S. (2016). Practice device artificial improvement basis of soil technologies jet grouting. *Procedia Engineering*, 165, 504–509.
- [3] Six, J., Camerata, J., Bevan, J., Greer, P., & White, J. (2015). *Hydraulics. Arizona*: Technical Learning College.
- [4] Курбатов, В. Л., & Кондарков, И. М. (2015). Опускные сооружения. *Эффективные строительные композиции*: сб. науч.-практ. конф. к 85-летию заслуж. деят. науки РФ, академика РАН, д-ра техн. наук Ю.М. Баженова. Белгород, 1-6.
- [5] *Проектирование электрохимической обработки грунтов. Коэффициент фильтрации глинистых грунтов*. Получено с <http://www.groont.ru/electro/projecting/12.html> (дата звернення: 05.01.2019).
- [6] Басниев, К., Дмитриев, Н., Каневская, Р., & Максимов, В. (2006). *Подземная гидромеханика*. 2-е издание. Москва: Институт компьютерных исследований.
- [7] Кретов, В., & Малишев, В. (2015). *Технічна термодинаміка та теплопередача*. Київ: Вид-во Університету «Україна».
- [8] *Упругость и пластичность горных пород*. Получено с <http://www.drillings.ru/uprugost> (дата звернення: 29.12.2018).
- [9] Пономарев, А. Б., Маковецкий, О. А., & Савинов, А. В. (2003). Проблемы инженерной защиты городских территорий от подтопления. Реконструкция исторических городов и геотехническое строит-во: *тр. Международ. конф. по геотехнике*. Москва: АСВ, Т. 2.
- [10] Xiangfu, Chen (2011). *Settlement Calculation on High-Rise Buildings*: Springer, 450 p.

© Колектив авторів
Статтю рекомендує до друку
д-р біол. наук, проф. Г. Г. Трохименко