УДК 556.3:502.51(282.03):728.1(1-21):(477-25)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.87.14>

О. Кошляков, д-р геол. наук, проф.
E-mail: kosh57@ukr.net;
О. Диняк, канд. геол. наук, доц.
E-mail: oksdyn@ukr.net;
Д. Чомко, канд. геол. наук, доц.
E-mail: dimath@ukr.net;
І. Кошлякова, інж.
E-mail: irkos@ukr.net;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ВРАХУВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ, РОЗПОДІЛУ ТА ВПЛИВУ ПІДЗЕМНИХ ВОД З МЕТОЮ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОГНОЗНОЇ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ НА ДІЛЯНКАХ УЩІЛЬНЕНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О.Л. Шевченком)

Проведені дослідження мають за мету розробку оптимального підходу, що дозволяє коректно оцінити гідрогеологічні умови будівельних майданчиків. Вивчені загальні закономірності формування, розподілу та руху підземних вод у межах ділянок проєктної та існуючої забудови і прилеглих до них територій на прикладі м. Києва. Для досліджуваної території та аналогічних ділянок зі складними гідрогеологічними умовами, які зумовлені чергуванням у розрізі та в плані шарів невитриманої потужності з різними коефіцієнтами фільтрації, доцільніше використати саме метод математичного моделювання геофільтрації з метою прогнозних розрахунків. Оскільки детальна гідрогеологічна карта ділянки відсутня, природну гідрогеологічну модель доречно будувати на основі даних інженерно-геологічних вишукувань (дані по рівнях підземних вод) на різні періоди часу, що відтворенні у середовищі ГІС.

Отримані результати дають змогу обґрунтувати математичну модель та з достатньою точністю виконати прогнозне моделювання для техногенно порушених територій. Застосування методу математичного моделювання дозволяє уникнути зайвої грубої схематизації природних гідрогеологічних умов, врахувати складність і розмаїтість граничних умов ґрунтового потоку і, тим самим, дати більш реальну оцінку впливу інженерних заходів на гідрогеологічні умови території.

Для врахування закономірностей формування, розподілу та руху підземних вод на ділянках ущільненої забудови доцільно, на думку авторів, проводити моделювання процесів геофільтрації за схемою наведеною у даній роботі. При цьому саме створення обґрунтованої математико-картографічної просторово-часової природної гідрогеологічної моделі території є визначальним моментом для подальшого моделювання. Застосування модуля Darcy Flow програмного засобу ArcGIS дозволяє виявити та уточнити умови живлення і розвантаження потоку підземних вод. Це дає можливість за рахунок, з одного боку, уникнення зайвої схематизації природних гідрогеологічних умов, з другого – врахування складності і різноманітності граничних умов ґрунтового потоку, дати більш реальну оцінку впливу можливих інженерних заходів під час будівництва на гідрогеологічні умови території.

Ключові слова: ущільнена забудова, підземні води, математичне моделювання, геофільтрація, картографічна модель

Вступ. При оцінці гідрогеологічних умов територій, де проводиться ущільнена забудова та відбувається облаштування нових будівельних котлованів, необхідно враховувати порушення умов поверхневого стоку атмосферних опадів за межі ділянки будівництва, відсіпку на території переміщених ґрунтів (які можуть накопичувати та утримувати у собі воду), втрати з існуючих водогінних комунікацій тощо. Всі ці чинники зумовлюють зміну умов міграції воли у зоні аерації, збільшення кількості води у верхніх частинах розрізу і часто призводять до зміни фізико-механічних та міцнісних властивостей ґрунтів (Koshliakov et al., 2017). Також при обґрунтуванні прогностичних моделей доцільно враховувати ділянки з різного роду слабопроникним поверхневим покриттям, фундаменти споруд, особливо палеві, різні екрануючі конструкції, що сприяють збільшенню вологості та можуть сприяти утворенню тимчасових водоносних горизонтів типу "верховодка" (Holzbecher, 2013). Така інформація зазвичай наявна у картографічному вигляді (Бертланд, 1986).

Викладення основного матеріалу. Так, на ділянці у м. Києві, де виконується будівництво офісно-житлового центру – багатоповерхові (19–27 поверхів) будинки з підземними (3–5) поверхами, за результатами попередніх досліджень до несприятливих інженерно-геологічних чинників необхідно віднести залягання в основі будівлі і будівельного майданчика товщі пілуватих насичених водою супісків, що мають пливунні властивості.

Гідрогеологічні умови на ділянці досліджень характеризуються наявністю двох горизонтів підземних вод. Перший приурочений до делювіальної товщі, виявлений за результатами інженерно-геологічних вишукувань на різні періоди часу на відмітках від 151,2 до 171,6 м. Горизонт безнапірний. Водовмісними породами є пілуваті лесоподібні супіски. Водотривким шаром слугують бурі та сіро-бурі глини (рис. 1).

Другий водоносний горизонт залягає в пісках полтавської світи. Горизонт безнапірний. Водотривким шаром служить мергельна глина. Вплив на коливання рівня підземних вод також можуть мати суглинисті різновиди харківської світи. Місцями горизонти утворюють єдиний водоносний горизонт.

Так, у 1993 р. рівень першого водоносного горизонту зафіксовано на відмітках 155,4–164,5 м; у 2004 р. – 151,8–171,6 м. У 2008 р. рівень зафіксовано на відмітках 155,0–171,6 м; у 2012 р. – 150,9–153,8 м; у 2016 р. – 150,7–167,6 м; у 2017 р. – 166,7–170,78 м.

Другий водоносний горизонт, виявлений на відмітках від 133,7 до 137,9 м, розкритий вишукувальними свердловинами тільки у 2004 та 2012 рр. У 2004 р. рівень зафіксовано на відмітках 133,9–137,9 м, у 2012 р. – 133,7–134,7 м.

Загальний напрямок руху підземних вод з півночі на південь у напрямку загального стоку (розвантаження в долину р. Либідь). Живлення водоносного горизонту відбувається за рахунок розвантаження підземних вод з боку схилу, інфільтрації атмосферних опадів та витоків з водогінних мереж. Прогнозний підйом рівня в горизонтах встановлюється на основі розрахунків гідрогеологічного режиму прилеглої території з врахуванням впливу загальних конструкцій офісно-житлового центру.

При аварійних витоках з інженерних мереж або випаданні великої кількості атмосферних опадів можливий локальний підйом рівня підземних вод і підтоплення фундаментів житлових будинків (Кошляков та ін., 2018). За аналогією із сусідніми територіями, суттєво впливають на режим водоносних горизонтів метеорологічні умови. Коливання рівнів протягом року становлять до 0,8...1,2 м, причому максимальні коливання спостерігаються після весняного сніготанення та тривалих атмосферних опадів.

Рис. 1. Схематичний геолого-гідрогеологічний розріз ділянки досліджень

Поповнення водоносних горизонтів відбувається за рахунок атмосферних опадів і втрат з водонесучих комунікацій. Частина ділянки території підтоплена верховодкою.

Режимні спостереження за змінами рівня ґрунтових вод на ділянці проводилося з червня 2015 р. по жовтень 2016 р. За цей час зафіксовано коливання рівнів амплітудою від 0,08 до 0,37 м.

З характеристики геолого-гідрогеологічних умов території досліджень випливає, що у результаті спорудження фундаментів будівель є ймовірність (Кошляков та ін., 2010):

- коливання рівнів ґрунтових вод, що зумовлені природними та техногенними чинниками;
- виникнення баражного ефекту як у водоносному шарі еолово-делювіальних відкладів, так і у водоносному горизонті в полтавських відкладах;
- виникнення опливин відкосів котловану через надмірне зволоження та низькі міцнісні властивості ґрунтів;
- активізація схилових процесів.

Тому, в даному випадку для прогнозних розрахунків використаний саме метод математичного моделювання геофільтрації (Holzbecher, 2013; Lalehzari et al., 2010).

Застосування методу математичного моделювання дозволяє уникнути зайвої грубої схематизації природних гідрогеологічних умов, врахувати складність і розмаїтість граничних умов ґрунтового потоку і тим самим дати більш реальну оцінку впливу інженерних заходів із реконструкції існуючої споруди на гідрогеологічні умови території (Жернов, 1982).

Детерміновані гідрогеодинамічні моделі будуються з використанням складної фізичної теорії і базуються на крайових задачах геофільтрації. Крайова задача – це диференціальне рівняння геофільтрації (рівняння математичної фізики другого порядку, еліптичного або параболічного типів) та крайові умови до нього (граничні умови та початкові умови) (Гавич, 1980). У такому розумінні моделювання – це розв'язання крайової задачі геофільтрації в стаціонарній або нестаціонарній постановках (Gorokhovski, 2012).

Моделювання процесів геофільтрації виконувалось у такій послідовності.

1. Спочатку за допомогою ArcGIS була створена математико-картографічна просторово-часова природна гідрогеологічна модель території на основі інформації, що отримана у процесі пошуково-розвідувальних робіт, а саме (рис. 2):

- геологічної будови території;

- умов залягання та поширення водоносних та слабопроникних шарів;

- основних гідрогеологічних параметрів водоносних і слабопроникних шарів та закономірностей їх зміни у розрізі та плані;

- умов живлення та розвантаження підземних вод.

Саме створення обґрунтованої математико-картографічної просторово-часової природної гідрогеологічної моделі території було визначальним моментом для подальшого моделювання. Його застосування при дослідженні забудованої території дало можливість поряд із побудовою порівняно простих моделей (найпростішими є ізолінії карти), застосовувати більш складні, які потребують перетворень математичних залежностей у картографічну форму та навпаки. Отже, були використані властивості математичних та картографічних моделей у процесі аналізу-синтезу складної просторово-часової гідрогеологічної інформації. Як відомо, картографічна компонента продовжує та розвиває математичну модель. Вона перетворює вихідну (початкову) інформацію відповідно до мети та завдань дослідження. Картографічне подання інформації дає змогу візуалізувати її у вигляді, оптимальному для дослідження, позбавляє від помилок та прорахунків, дає уявлення про точність математичного моделювання та його географічну вірогідність. На думку авторів, найефективнішим при цьому було застосування модуля *Darcy Flow* програмного засобу ArcGIS, що дозволило на основі міркувань балансу та ламінарного закону руху виявити та уточнити умови живлення і розвантаження потоку підземних вод.

2. Потім створювалась геофільтраційна модель на основі складеної природної. На ній реальна гідрогеологічна обстановка була формалізована з виділенням основних чинників формування підземних вод (водоносних, слабо проникних шарів і їх меж, джерел живлення, розподілу параметрів, граничних умов на межах) та встановленням їх кількісних характеристик.

3. Після цього на основі геофільтраційної була побудована розрахункова математична модель, яка враховує режим фільтрації, необхідність розділення водоносного пласта на декілька розрахункових шарів, планову розбивку області фільтрації на розрахункові блоки, інфільтрацію атмосферних опадів та техногенних вод. Адекватність розрахункової моделі перевірялась шляхом розв'язання оберненої задачі з побутівими початковими умовами розподілу рівнів підземних вод, їх живлення та розвантаження (Шестопалов та ін., 1991).

У процесі розв'язання оберненої задачі виконувалось уточнення та корегування як параметрів геофільтраційної моделі, так і джерел формування підземних вод. Межі області фільтрації у плані вибрані таким чином, щоб у ній витримувалася рівність прибуткових та витратних елементів балансу підземних вод. На півночі межа проходить по геоморфологічній вододільній лінії. Тут прийнята гранична умова I-го роду ($H = \text{const}$) по гідроізопісї з відміткою 194,0 м. Бокові межі, західна та східна, проведені по лініях течії підземних вод. На цих межах прийнята гранична умова II-го роду ($q = \text{const} = 0$). На півдні гідродинамічна межа проходить по колишньому дну яра, над яким була споруджена дорога. Про наявність цієї дрени свідчить ухил поверхні підземних вод у бік дороги з обох її сторін. На верхній межі (на поверхні горизонту) приймається гранична умова II-го роду ($q = \text{const}$), яка відповідає інфільтраційному живленню природного та техногенного

походження, нижня межа (на підшві горизонту) – гранична умова II-го роду ($q = \text{const} = 0$) – прийнята по поверхні супіску харківської світи.

Вибір геофільтраційних параметрів об'єкта моделювання проведений на основі вивчення: інженерно-геологічних розрізів; геофільтраційних параметрів порід (коефіцієнти фільтрації, пористість), які отримані у результаті лабораторних робіт (точкові визначення); даних визначення рівня ґрунтових вод в інженерно-геологічних свердловинах.

На рис. 3 наведено розташування природної поверхні рівня підземних вод у вигляді карти гідроізопісї за даними моделювання (другий водоносний горизонт приурочений до полтавських пісків).

4. На основі відкоригованої розрахункової моделі був виконаний прогностичний розрахунок рівнів підземних вод за умов різних варіантів техногенного впливу при будівництві та експлуатації споруд.

Рис. 2. Приклад просторової природної гідрогеологічної моделі на ділянці м. Києва:

- 1 – поверхня гідродинамічних напорів, 2 – пористість водонасиченої товщі, 3 – водопровідність водоносного горизонту, 4 – баланс моделі за Дарсі

Висновки. Виконане авторами моделювання та аналіз отриманих результатів дозволяють зробити такі висновки.

1. Для врахування закономірностей формування, розподілу та руху підземних вод на ділянках ущільненої забудови доцільно, на думку авторів, проводити моделювання процесів геофільтрації за схемою, наведеною у даній роботі. При цьому саме створення обґрунтованої математико-картографічної просторово-часової природної гідрогеологічної моделі території було визначальним моментом для подальшого моделювання. Застосування модуля *Darcy Flow* програмного засобу ArcGIS дозволило виявити та уточнити умови живлення і розвантаження потоку підземних вод.

2. Це дає можливість за рахунок, з одного боку – уникнення зайвої схематизації природних гідрогеологічних умов, з другого – врахування складності і різноманітності граничних умов ґрунтового потоку, дати більш реальну оцінку впливу інженерних заходів під час будівництва на гідрогеологічні умови території.

Рис. 3. Природна розрахункова модель.

- 1 – інженерно-геологічні свердловини з відмітками рівня підземних вод першого від поверхні горизонту, 2 – інженерно-геологічні свердловини з відмітками рівня підземних вод другого від поверхні горизонту, 3 – гідроізопісї рівня підземних вод другого водоносного горизонту за даними моделювання

3. Максимальний перепад рівня підземних вод, зафіксований на ділянці за час проведення спостережень, може призвести до виникнення значних градієнтів гідродинамічного напору. Найбільший спостерігатиметься безпосередньо біля стінок споруди. Це може призвести до активізації суфозійних та інших небезпечних процесів.

4. Аналіз геолого-гідрогеологічних умов вказує на необхідність розрахунку в подальшому декількох варіантів захисних заходів, з яких буде обрано оптимальний на основі техніко-економічних розрахунків.

Список використаних джерел

- Бертлянд, А.М. (1986). Использование карт в науках о Земле. М.
Гавич, И.К. (1980). Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М.
Жернов, И.Е. (1982). Динамика подземных вод. К.
Кошляков, О., Диняк, О., Кошлякова, И., (2010). Використання картографічного моделювання при вивченні підземної гідросфери. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 32, 38-41.

Кошляков, О., Диняк, О., Кошлякова, І., Кошлякова, Т. (2018). Гідрогеологічні особливості розрахунків стійкості укосів і схилів у межах урбанізованих територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 83, 79-83.

Шестопапов, В. М. та ін. (1991). Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в нарушенных условиях. К.

Gorokhovskiy, V. (2012). Effective Parameters of Hydrogeological Models. NY. Holzbecher, E. (2013). Aquifer Physics Modes for Hydrogeological Modeling. *Application of the COMSOL Physics Builder, COMSOL Conference in Rotterdam, Holland*.

Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2017). Tehnogenic infiltration nutrition component under groundwater as a factor the emergence and activation of dangerous exogenous processes in industrial and city agglomerating territories. *Abstracts of XI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of Environment"*, Kyiv, Ukraine.

Lalehzari, R., Tabatabaei, S. H., Kholghi, M. (2010). Hydrodynamic coefficients estimation and aquifer simulation using PMWIN model. *Fourteenth International Water Technology Conference (IWTC-14)*, Cairo, Egypt.

References

Berland, A.M. (1986). The use of maps in earth sciences. M. [in Russian] Gavich, I.K. (1980). Theory and practice of applying modeling to hydrogeology. M. [in Russian] Gorokhovskiy, V. (2012). Effective Parameters of Hydrogeological Models. NY.

Holzbecher, E. (2013). Aquifer Physics Modes for Hydrogeological Modeling. *Application of the COMSOL Physics Builder, COMSOL Conference in Rotterdam, Holland*.

Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I., Koshliakova, T. (2018). Hydrogeological peculiarities of calculation of scarps and slopes stability within urbanized territories. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University of Kyiv: Geology*, 83, 79-83. [in Ukrainian]

Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2010). Using of cartographic desing for the study of underground hydrosphere. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 32, 38-41. [in Ukrainian]

Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2017). Tehnogenic infiltration nutrition component under groundwater as a factor the emergence and activation of dangerous exogenous processes in industrial and city agglomerating territories. *Abstracts of XI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of Environment"*, Kyiv, Ukraine.

Lalehzari, R., Tabatabaei, S. H., Kholghi, M. (2010). Hydrodynamic coefficients estimation and aquifer simulation using PMWIN model. *Fourteenth International Water Technology Conference (IWTC-14)*, Cairo, Egypt.

Shestopalov V.M. et al., (1991). Water cycle in hydrogeological structures of Ukraine: Water cycle in disturbed conditions. K. [in Russian]

Zhernov, I.E. (1982). Dynamics of groundwater. K. [in Russian]

Надійшла до редколегії 25.08.19

O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: kosh57@ukr.net;
O. Dyniak, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.
E-mail: oksdyn@ukr.net;
D. Chomko, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.
E-mail: dimath@ukr.net;
I. Koshliakova, Engineer
E-mail: irkos@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

THE STUDY OF THE LAWS OF FORMATION, DISTRIBUTION, AND INFLUENCE OF GROUNDWATER TO JUSTIFY SUBSTANTIATE THE PREDICTED HYDROGEOLOGICAL MODEL AT THE URBAN COMPACTED AREA

The conducted researches have the purpose to develop the optimum approach which allows us to correctly estimate the hydrogeological conditions of building sites. The general patterns of formation, distribution and movement of groundwater within the sections of the planned and existing buildings and adjacent territories for Kyiv as an example were studied. For the study area and similar sites with complex hydrogeological conditions, which are caused by the alternation in section and in terms of layers of unsteady thickness with different filtration coefficients, it is more appropriate to use the method of mathematical modeling of geofiltration for predictive calculations. Since there is no detailed hydrogeological map of the site, it is advisable to build a natural hydrogeological model on the basis of engineering and geological survey data (groundwater levels data) for different periods reproduced by GIS.

The obtained results make it possible to justify the mathematical model and to perform predictive modeling with sufficient accuracy for technogenically disturbed territories. The application of mathematical modeling allows avoiding unnecessary rough schematization of natural hydrogeological conditions, taking into account the complexity and diversity of boundary groundflow conditions, and thus give more realistic assessment of engineering measures impact on hydrogeological conditions of the territory.

In order to take into account the patterns of formation, distribution and movement of groundwater for territories with dense urban development it is advisable, according to the authors, to simulate processes geofiltration according to the scheme given in this article. At the same time, the creation of scientifically sound mathematical and cartographic space-time natural hydrogeological model of the territory is the defining moment for further modeling. Application of Darcy Flow module of ArcGIS software enables to detect and specificate groundwater flow recharge and discharge conditions. This makes it possible, on the one hand, to avoid unnecessary schematization of natural hydrogeological conditions, and on the other hand, to take into account the complexity and diversity of groundflow boundary conditions, to give a more realistic assessment of possible engineering measures impact on the hydrogeological conditions of the territory during the construction.

Keywords: dense urban development, groundwater, mathematical modeling, geofiltration, cartographic model.

A. Кошляков, д-р. геол. наук., проф.,
E-mail: kosh57@ukr.net;
О. Диняк, канд. геол. наук., доц.,
E-mail: oksdyn@ukr.net;
Д. Чомко, канд. геол. наук., доц.,
И. Кошлякова, инж.,
E-mail: irkos@ukr.net;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ВЛИЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ ПРОГНОЗНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА УЧАСТКАХ УПЛОТНЕННОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Исследования проведены с целью разработки оптимального подхода, позволяющего корректно оценить гидрогеологические условия строительных площадок. При этом изучены общие закономерности формирования, распределения и движения подземных вод в пределах участков проектной и существующей застройки, а также прилегающих к ним территорий на примере г. Киева. Для прогнозных расчетов на исследуемой территории и аналогичных участках со сложными гидрогеологическими условиями, которые обусловлены чередованием в разрезе и в плане слоев невидимой мощности с различными коэффициентами фильтрации, целесообразнее использовать именно метод математического моделирования геофильтрации. Так как подробная гидрогеологическая карта участка отсутствует, естественную гидрогеологическую модель целесообразно строить на основе данных инженерно-геологических изысканий (данные по уровням подземных вод) на различные периоды времени, построенные в среде ГИС.

Полученные результаты позволяют обосновать математическую модель и с достаточной точностью выполнить прогнозное моделирование для техногенно нарушенных территорий. Применение метода математического моделирования позволяет избежать излишней грубой схематизации природных гидрогеологических условий, учесть сложность и разнообразие граничных условий почвенного потока и тем самым дать более реальную оценку влияния инженерных мероприятий на гидрогеологические условия территории.

Для учета закономерностей формирования, распределения и движения подземных вод на участках уплотненной застройки целесообразно, по мнению авторов, проводить моделирование процессов геофильтрации по схеме, приведенной в данной работе. При этом именно создание обоснованной математико-картографической пространственно-временной природной гидрогеологической модели территории является определяющим моментом для дальнейшего моделирования. Применение модуля Darcy Flow программного средства ArcGIS позволяет выявить и уточнить условия питания и разгрузки потока подземных вод. Это дает возможность, с одной стороны, избежать излишней схематизации природных гидрогеологических условий, а с другой – учесть сложность и разнообразие граничных условий почвенного потока, дать более реальную оценку влияния возможных инженерных мероприятий при строительстве на гидрогеологические условия территории.

Ключевые слова: плотная застройка, подземные воды, математическое моделирование, геофильтрация, картографическая модель.