

УДК 532.5.013

## **ПОБУДОВА ПОВЕРХНІ, ЩО ВИЗНАЧАЄ НАПРУГИ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ ЦИЛІНДРОВОЇ ФОРМИ ПІД ДІЄЮ ГРУНТОВИХ ВОД**

Єремєєв В.С., д.т.н.,

Лебедев В.О., к.т.н.

*Мелітопольська школа прикладної геометрії*

*Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького (Україна)*

*Розроблена модель для проведення аналізу впливу ґрунтових вод на утворення механічної напруги в підземних спорудах циліндрової форми. Визначена величина виштовхуючої сили, що діє на фундамент. Побудована поверхня, яка визначає залежність еквівалентної напруги фундаменту від її параметрів і характеристик водоносного шару в найбільш небезпечних місцях фундаменту.*

*Ключові слова: водоносний шар, ґрунтові води, коефіцієнт п'езопровідності, механічне навантаження, підземна споруда, поверхня, еквівалентна напруга, фільтрація, формула Дарсі, фундамент.*

*Постановка проблеми.* Дія ґрунтових вод на підземні частини будівельних споруд може привести до тяжких наслідків [1]. Підтоплення будов є причиною зміни властивостей матеріалів, викликає деформацію і руйнування конструкцій. Прогнозуванню небажаної ситуації, пов'язаної з несприятливим впливом підтоплення на підземні частини будівельних об'єктів і, зокрема, фундаментів, приділяється велика увага [2], тому проведення досліджень в цьому напрямі має практичний інтерес [3].

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Надійність експлуатації підземних споруд багато в чому залежить від поведінки ґрунтових вод в зоні фундаменту. Зазвичай передбачається, що механічна дія ґрунтових вод на фундамент визначається відстанню між фундаментом і верхньою межею водоносного шару [1]. Подібний підхід дозволяє оцінити максимальне значення тиску води. Насправді, водоносний шар є динамічною системою, і величина тиску залежить від великого числа чинників. Теорія перенесення води в пористих ґрунтах побудована на основі формули Дарсі, яка використовується при вивченні фільтрації рідини. Розподіл тиску води в ґрунтовому пласті має вигляд [4]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \Delta p(x, y, z), \quad (1)$$

де  $\chi = k_{\phi} / (\rho g (m\beta_e + \beta_{zp}))$  – коефіцієнт п'єзопровідності,  $k_{\phi}$  – коефіцієнт фільтрації,  $\rho$  – щільність води,  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $m$  – пористість ґрунту,  $\beta_e$  – коефіцієнт об'ємного стискування води,  $\beta_{zp}$  – коефіцієнт об'ємного стискування твердої частини ґрунту.

Коректний опис ролі водоносного шару при вивченні механічної дії ґрунтових вод на підземні споруди може бути отриманий з використанням рівняння (1).

**Формування мети статті.** Нехай об'єкт циліндричної форми з радіусом  $R$  розташований у водоносному шарі завтовшки  $h$ , рис. 1.

У плоскорадіальному випадку, коли тиск залежить тільки від радіусу  $r$ , рівняння (1) спрощується:

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

Рішення рівняння (2) з подальшим аналізом напружено-деформованого стану в основі підземної споруди дозволяє побудувати поверхню, яка визначає залежність напруги у фундаменті від його параметрів і характеристик водоносного шару. Рішення проведемо для наступних умов:

$$p(r, 0) = p(\infty, t) = P_0 = h\rho g = const, \quad \partial p / \partial r_{r=R} = const. \quad (3)$$

**Основна частина.** Рішення рівняння (2) у разі нескінченної труби з нульовим радіусом, рис.1, знайдено в роботі [4] при виконанні умов  $p(r, 0) = p(\infty, t) = P_0 = h\rho g = const$ . Якщо припустити, що в початковий момент часу  $t=0$  в точці  $r=0$  починає діяти стік потужністю  $D$ , то рішення має вигляд:

$$p(r, t) = P_0 \left\{ 1 + \frac{D\rho g}{4\pi h P_0 k_{\phi}} \left[ \ln z + 0,5772 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n n!} z^n \right] \right\}, \quad (4)$$

де  $z = r^2 / 4\chi t$ .

Приватна похідна функції (4) по радіусу дорівнює:

$$\frac{\partial p(r, t)}{\partial r} = \frac{D\rho g}{2\pi h k_{\phi} r} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} z^n \right]. \quad (5)$$

Припустимо, що на зовнішній поверхні труби радіусу  $R$  задано

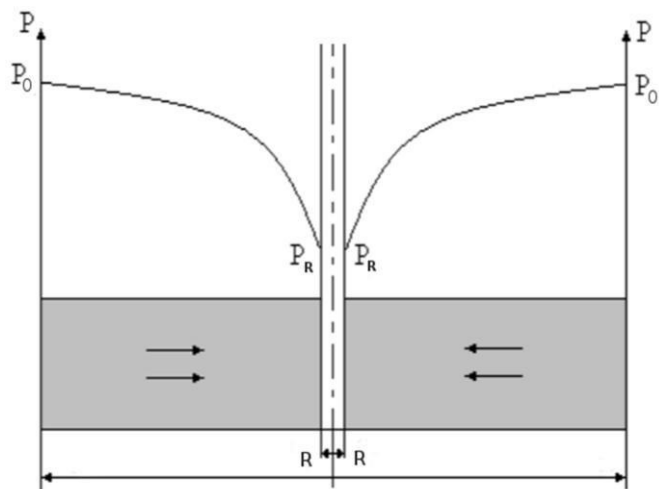


Рис. 1. Розподіл тиску в зоні об'єкту циліндричної форми

потік, визначуваний формулою (5), тобто гранична умова має вигляд:

$$\frac{\partial p(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{D\rho g}{2\pi h k_{\phi} R} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} b^n \right], \quad (6)$$

де  $b=R^2/4\chi t$ .

В цьому випадку рішенням рівняння (2) з початковими і граничними умовами (3) і (6) для труби радіусу  $R$ , буде функція (4). Зокрема, тимчасова залежність тиску на поверхні труби визначиться формулою:

$$P(a,b) = h\rho g \left\{ 1 + a [\ln b + 0,5772 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} b^n] \right\}, \quad (7)$$

де  $a=D\rho g/4\pi P_0 k_{\phi}$ ,  $b=R^2/4\chi t$ .

Відомо, що гідростатичний тиск води може викликати спливання підземної споруди, привести до зрушення і перекидання фундаменту або появи в них тріщин. У відповідність з формулою (7) величина сили, що виштовхує фундамент, дорівнює:

$$F(a,b) = \pi R^2 h\rho g \left\{ 1 + a [\ln b + 0,5772 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} b^n] \right\}. \quad (8)$$

Оцінимо напругу, що виникає під дією тиску (7) на фундамент круглого перерізу радіусу  $R$  і завтовшки  $d$ . Максимальне навантаження під дією тиску виникає на поверхні плити поблизу контуру. Відповідна еквівалентна розтягуюча напруга залежить від способу закріплення плити і дорівнює [5]:

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{3}{4} \frac{pR^2}{b^2} \quad (\text{жорстке закріплення}), \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{3}{8} (3 + \nu) \frac{pR^2}{d^2} \quad (\text{вільна плита}),$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

В якості матеріалу для фундаментів в підземних спорудах зазвичай використовується бетон. Значення  $\nu$  бетону приблизно рівний 0,17. В цьому випадку коефіцієнт, що стоїть у виразі (9) перед  $pR^2/d^2$  для вільної плити, рівний 1,19, що по порядку величини близько до аналогічного коефіцієнта у формулі (9) для жорсткого закріплення і рівному 0,75. Тому при проведенні оцінних розрахунків можна скористатися наближеним виразом

$$\sigma_{\text{екв}} \approx \frac{pR^2}{d^2}. \quad (10)$$

Підставляючи (7) у формулу (10), отримаємо наступний вираз для визначення еквівалентної напруги:

$$\sigma_{\text{экв}}(a,b,c) = c \left\{ 1 + a \left[ \ln b + 0,5772 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n n!} b^n \right] \right\}. \quad (11)$$

де  $c=R^2 h \rho g / d^2$ ,  $a=D/4\pi h k_{\phi}$ ,  $b=R^2/\chi t$ .

Залежність  $\sigma_{\text{экв}}$  від  $a$  і  $b$  при  $c=1$ , розрахована по формулі (11), представлена в таблиці.1 і на рис.2 у вигляді поверхні.

Таблиця 1

Залежність еквівалентної напруги в МПа від безрозмірних параметрів  $a$  і  $b$  для  $c=1$

Перший рядок - параметр b, стовпець ліворуч - параметр a.					
$a \backslash b$	0.355	0.0355	0.0065	0.0015	0.00015
0.030	0.986	0.917	0.866	0.822	0.753
0.070	0.968	0.807	0.688	0.585	0.424
0.090	0.959	0.752	0.599	0.467	0.260
0.120	0.945	0.669	0.465	0.289	0.013

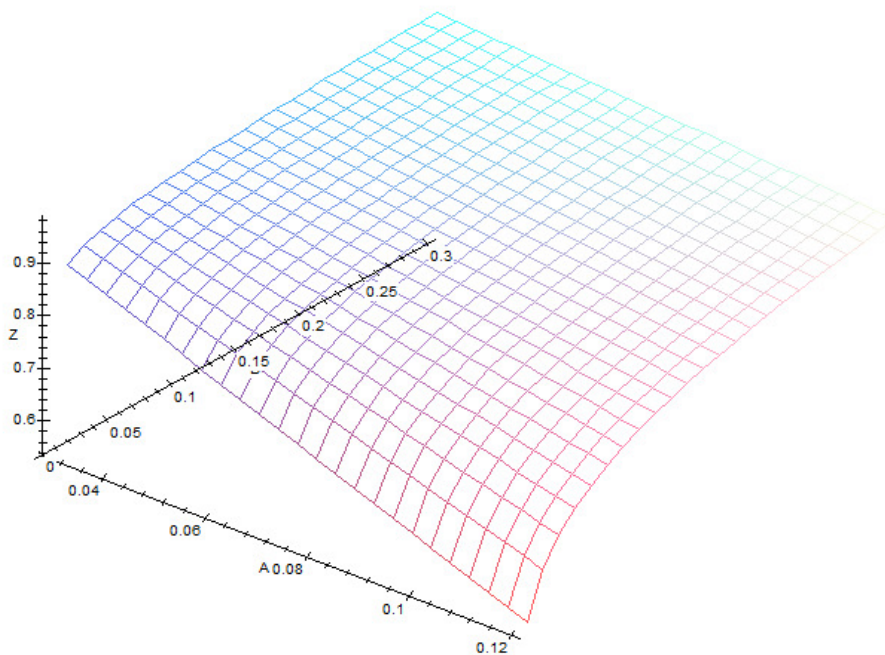


Рис.2. Залежність еквівалентної напруги в МПа від безрозмірних параметрів  $a$  і  $b$  для  $c=1$

Границя міцності бетону на розтягування  $\sigma_b$  залежить від його марки. Допустиме значення  $\sigma_{\text{экв}}$ , визначуване формулою (11), не повинне перевищувати цієї величини, а допустимий тиск, обчислений за формулою (7) не повинен перевищувати  $p_b$ . Значення  $\sigma_b$  для бетону змінюється в межах (1÷3) МПа [6]. Згідно таблиці. 1 і рис.2 величина напруги знаходиться в допустимих границях при  $c=1$ ,

$a \leq 0,12$ ,  $b \leq 0,355$ . З формули (11) видно, що збільшення параметра  $c$  в  $k$  разів призводить до підвищення напруги в стільки ж разів. Отже, при  $k=3$  і більше величина напруги знаходиться на рівні границі міцності бетону в широкому інтервалі зміни параметрів  $a$  і  $b$ .

**Висновки.** Отримані результати дозволяють досліджувати механічну дію ґрунтових вод на підземні споруди. Вирази (7), (8) і (11) визначають величину тиску води на фундамент, виштовхуючу силу, що діє на фундамент, і величину еквівалентної напруги в найбільш небезпечному місці фундаменту циліндричної форми. Обговорювані формули містять більше десяти параметрів, які доцільно розбити на дві групи. Перша група характеризує фізико-хімічні властивості водоносного шару. Вона включає коефіцієнт фільтрації водоносного шару  $k_\phi$ , коефіцієнти динамічної  $\mu$  і кінематичної  $\eta$  в'язкості, щільність ґрунту  $\rho$ , пористість ґрунту  $m$ , коефіцієнт об'ємного стискування води  $\beta_v$ , коефіцієнт об'ємного стискування твердої частини ґрунту  $\beta_{sp}$  і коефіцієнт п'єзопровідності  $\chi$ . До другої групи входять чинники, які визначають товщину водоносного шару  $h$  і умови зовнішньої дії підземної споруди: час  $t$ , швидкість відкачування води з водоносного шару  $D$ , розмір і форма підземної споруди (у разі циліндричної форми - радіус  $R$ ). Таким чином, для обчислення тиску потрібна інформація, принаймні, про десяток параметрів. Багато хто з них вимірюється з точністю до порядку. Наприклад, коефіцієнт п'єзопровідності знаходиться в межах  $102-105 \text{ м}^2/\text{с}$ , тому для надійного прогнозування рівня тиску потрібно проведення великого комплексу експериментальних досліджень.

Використання безрозмірних параметрів  $a = D/4\pi h k_\phi$  і  $b = R^2 \rho g m \beta_v / k_\phi t$  спрощує проведення теоретичного аналізу. За сприятливих умов досить поставити декілька дослідів для оцінки  $a$  і  $b$ , знання яких дозволяє прогнозувати силову дію водоносного шару на підземну споруду. В цьому випадку необхідність виміру усіх характеристик, визначальних  $a$  і  $b$  (швидкість відкачування води  $D$ , товщина водоносного шару, коефіцієнт фільтрації і так далі), відпадає.

### **Литература**

1. Зарубина Л. П. Защита территорий и строительных площадок от подтопления ґрунтовыми водами / Л.П. Зарубина. – М.: «Инфраинженерия», 2017. – 212 с.
2. Болдырев Г.Г. Механика ґрунтов. Основания и фундаменты [Учеб. пособие. 4-е изд., перераб. и доп.] / Г.Г.Болдырев, М.В.Малышев. – Пенза: ПГУАС, 2009.
3. Проектирование и расчет подземных сооружений [Электронный ресурс] / В.П. Петрухин, Д.Е. Разводовский, И.В. Колыбин, Б.Ф.Кисин. – НИИОСП, 2008. Режим доступа:

[http://www.eccpf.com/upload/publikazii/XII%20tom%20RASEh\\_pr oektirovanie.pdf](http://www.eccpf.com/upload/publikazii/XII%20tom%20RASEh_pr oektirovanie.pdf)

4. Басниев К. Подземная гидромеханика. 2-е издание / К. Басниев, Н. Дмитриев, Р. Каневская, В. Максимов. – М.: «Институт компьютерных исследований», 2006. – 488с. ISBN 5-93972-547-3.
5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов [Учебник] / В.И.Феодосьев. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 590 с.
6. Свод правил СП 41.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Дата введения 2013-01-01.

### **ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕНИЕ В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРУНТОВЫХ ВОД**

Еремеев В.С., Лебедев В.А.

*Разработана модель для проведения анализа влияния грунтовых вод на возникновение механического напряжения в подземных сооружениях цилиндрической формы. Определена величина силы, которая действует на фундамент. Построена поверхность, которая определяет зависимость эквивалентного напряжения фундамента от его параметров и характеристик водоносного слоя в наиболее опасных местах фундамента*

*Ключевые слова: водоносный слой, грунтовые воды, коэффициент пьезопроводимости, подземная конструкция, поверхность, эквивалентное напряжение, фильтрация, формула Дарси, фундамент.*

### **CONSTRUCTION OF SURFACE DETERMINING STRESS IN UNDERGROUND STRUCTURES OF CYLINDRICAL FORM UNDER THE ACTION OF GROUND WATER**

Eremeev V., Lebedev V.

*A model has been developed for analyzing the effect of groundwater on the formation of mechanical stresses in underground structures of cylindrical shape. The buoyancy force acting on the foundation is determined. A surface is constructed that determines the dependence of the equivalent voltage in the most dangerous places of the basement on its parameters and characteristics of the aquifer.*

*Key words: aquifer, groundwater, coefficient of gravity, mechanical load, underground structure, surface, equivalent voltage, filtration, Darcy formula, foundation.*