

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНИХ ЗАВІС ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПІДТОПЛЕННЯ АВТОДОРІГ

Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л.А.

1. Вступ

При прокладанні доріг особлива увага розробників проектів приділяється безпеці руху автомобілів. Прокладання доріг та підтримка їх в робочому задовільному стані займає багато зусиль, часу та фінансування. В Україні проблему бездоріжжя прийнято вирішувати, коли дорожній рух стає вже неможливим, особливо це стосується доріг міжміського сполучення. Майже всі обласні автошляхи стають непридатними для проїзду, особливо ті, що ведуть до віддалених і гірських сіл, де дорога – це єдине, що з'єднує ці населені пункти з районним центром. Дорожню галузь фінансують за залишковим принципом. Проблема бездоріжжя в Україні вже давно ні для кого не є новиною і всі звикли, що дороги кожної весни сходять разом із снігом. Крім природних факторів, що впливають на стійкість автошляхів, є фактори техногенного походження, зокрема підтоплення, викликане порушенням водного балансу підземних вод через зрошення полів, що розташовані вздовж автошляхів.

Тому актуальним є вирішення проблеми відведення ґрунтових вод та поверхневого стоку з доріг. Дорожні смуги, які простягаються вздовж зрошувальних полів, схильні до локального підтоплення і потребують особливої уваги до себе.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є процес підтоплення дорожнього полотна в зоні впливу зрошувальних полів.

В роботі розглядається ділянка автошляху Р51, яка проходить поблизу Національного природного парку «Гомільшанські ліси» (Зміївський район, Харківська область, Україна), поєднує такі села, як Пасіки та Западня. Свердловина, в якій проводились вимірювання рівнів ґрунтових вод (РГВ), знаходиться в 50–80 м від цієї ділянки автошляху.

Автошлях Р 51 – регіональний автомобільний шлях в Україні, Мерефа – Павлоград. Проходить територією Харківського і Зміївського, Первомайського, Лозівського районів Харківської області та Юр'ївського, Павлоградського районів Дніпропетровської області. Географічне розташування об'єкту досліджень представлено на рис. 1. Свердловина, в якій проводився моніторинг РГВ поблизу автошляху, наведена на рис. 2.

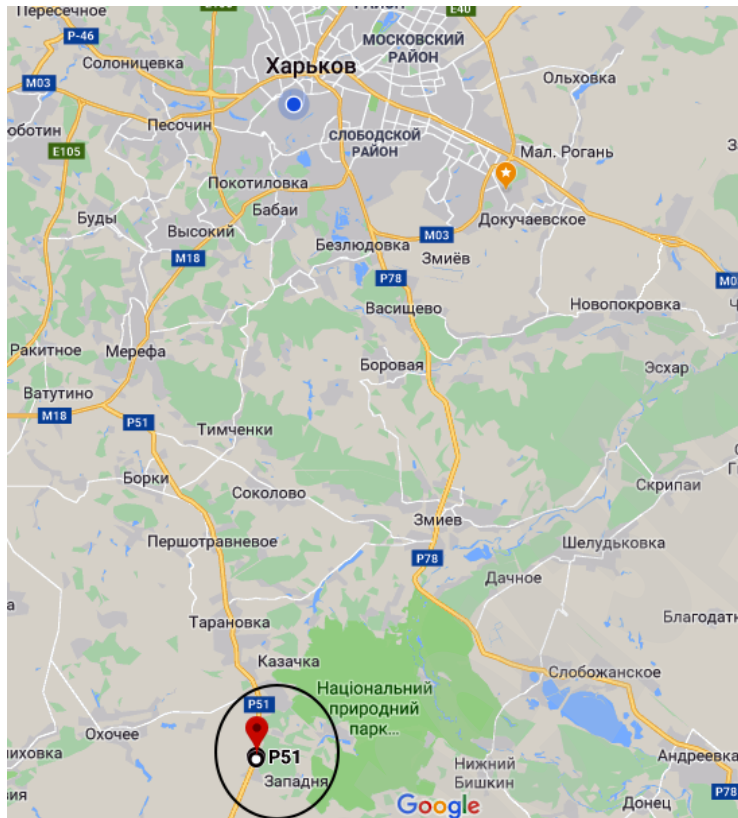


Рис. 1. Географічне розташування об'єкту досліджень

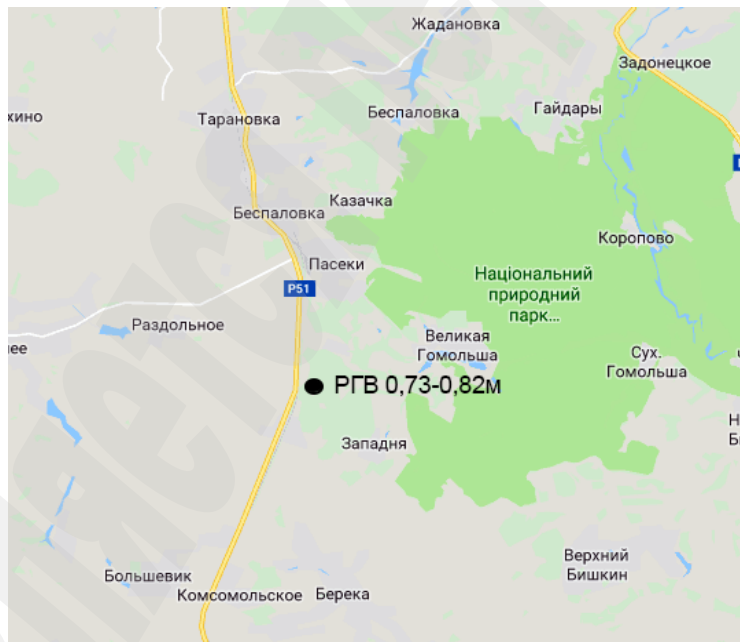


Рис. 2. Свердловина, в якій проводився моніторинг рівня ґрунтових вод

Свердловина, в якій проводились вимірювання РГВ, має координати: $49^{\circ}54'24''N$, $36^{\circ}18'16''E$. Вимірювання проводились Харківською комплексною геологічною експедицією в період з 2006 по 2015 рр. (табл. 1) згідно [1].

Таблиця 1

Значення рівнів ґрунтових вод в точці контролю

Рік виміру	Середньомісячні значення рівнів ґрунтових вод (за даними строкових спостережень)												Середньорічні значення рівнів ґрунтових вод $H_{ср}$, м
	Місяці												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2006	0,8	0,75	0,63	0,82	0,82	0,81	0,89	0,93	0,88	0,78	0,8	0,79	0,81
2007	0,79	0,73	0,56	0,80	0,80	0,79	0,88	0,89	0,85	0,79	0,82	0,8	0,79
2008	0,82	0,74	0,42	0,35	0,33	0,72	0,95	1,06	0,93	0,80	0,84	0,80	0,73
2009	0,82	0,65	0,39	0,74	0,65	0,69	0,94	0,96	0,93	0,89	0,72	0,78	0,78
2010	0,8	0,81	0,82	0,67	0,82	0,96	1,06	0,97	0,95	0,75	0,84	0,67	0,82
2011	0,75	0,72	0,68	0,65	0,75	0,79	0,87	0,92	0,98	0,89	0,85	0,79	0,78
2012	0,76	0,71	1,14	0,99	0,98	0,99	0,96	1,03	1,02	0,93	0,81	0,83	0,93
2013	0,81	0,77	0,88	0,93	0,95	0,96	0,95	0,97	0,99	0,87	0,75	0,76	0,88
2014	0,79	0,88	1,05	0,97	0,96	0,98	0,96	1,02	1,01	0,95	0,91	0,87	0,95

З графіку на рис. 3 видно, що глибина залягання РГВ на ділянці досліджень не завжди корелює з кількістю атмосферних опадів. Це можна пояснити дією додаткового техногенного навантаження від впливу автошляху та зрошувальних полів на річні зміни рівнів ґрунтових вод.

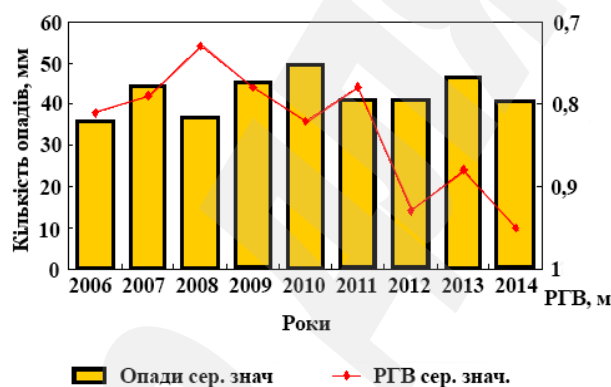


Рис. 3. Середні значення глибини залягання рівня ґрунтових вод та кількість опадів за період досліджень з 2006 по 2014 рр.

Таким чином, техногенні фактори впливу на цій ділянці переважають природні, що спричинене впливом зрошувальних полів та автошляху на зміну рівня ґрунтових вод [2]. Надмірний вміст вологи знижує несучу здатність ґрунту, що призводить до прискореного руйнування і укорочення терміну служби дороги. У таких випадках дорозі з проблемами водовідведення потрібно більш частий ремонт і відновлення, ніж тій, на якій водовідведення функціонує нормально. Тому витрати на влаштування покриття необхідно порівнювати з витратами на підтримку водовідведення.

В Україні ремонт та утримання автомобільних доріг здійснюється згідно документу «П-Г.1-218-113:2009. Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України» [3]. Але спеціального документу щодо укріплення узбіч автомобільних доріг, в якому мають бути прописані правила та вказівки із укріплення узбіч та відведення води в Україні, немає. Використовується лише документ 1980 р.: «ВСН 39-

79. Технические указания по укреплению обочин автомобильных дорог» [4]. Наприклад, в Росії є «ОДН 218.3.039-2003. Укрепление обочин автомобильных дорог» [5].

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – попередження підтоплення автодоріг шляхом встановлення протифільтраційних завіс.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Обґрунтувати дію техногенних факторів на зміну рівня ґрунтових вод.
2. Запропонувати інженерний захід для захисту дорожнього полотна від шкідливої дії ґрунтових вод.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

В роботі [6] проведена інвентаризація підтоплень, що виникли внаслідок будівництва доріг. Проблема підтоплення розглядається тільки збоку антропогенного впливу доріг на розвиток підтоплення. Але вплив підтоплення на стійкість доріг, та вплив полів зрошення поблизу автошляхів на зміну рівнів ґрунтових вод в роботі не розглянуто. Тобто проблема розглядається не комплексно та ряд важливих техногенних факторів не враховано.

Автор роботи [7] наводить варіанти застосування протифільтраційних завіс у містах як для захисту від підтоплення окремих майданчиків, будівель і споруд, так і для будівництва несучих і огорожувальних конструкцій і фундаментів. Автор робить акцент тільки на одному типі протифільтраційних завіс – залізобетонних, для захисту станцій метрополітену від дії підземних вод. Проте протифільтраційні завіси з відмінними параметрами не розглядаються.

Результати комплексних досліджень мікроструктури та інтенсивності фільтрації протифільтраційних завіс висвітлені в роботі [8]. Проте є невирішеним питання довжини та глибини занурення протифільтраційних завіс.

Автори роботи [9] дослідили ефективність встановлення протифільтраційних завіс для захисту фундаменту греблі. Дослідження проведені для обмеженої кількості варіантів вибору матеріалів для протифільтраційних завіс, що обмежує можливості використання протифільтраційних завіс.

Концепція «композитної стіни» у якості протифільтраційної завіси з використанням глини та бетону, як основних складових завіси, представлена в роботі [10]. Але автори надають детальне обґрунтування параметрів тільки двох типів протифільтраційних завіс: глиняної та бетонної, та пропонують використовувати завіси в обмежених умовах.

Існуючі методики фільтраційних розрахунків при малій потужності потоків ґрунтових вод і на початку необводнених ґрунтів [11, 12] охоплюють не всі важливі випадки підтоплення і дренажування. Наприклад, раніше не було відомо точного рішення при радіальному розтіканні по водоупорах в необводнених ґрунтах, а також інші випадки.

Останні публікації про верховодки і потоки ґрунтових вод малої потужності [13] містять рішення в рамках лінеаризованої гідравлічної теорії фільтрації. Та носять приватний характер з ідеалізованими постановками про нескінченно віддалені кордони впливу, тобто з досить наближеними рішеннями.

Огляд публікацій [14, 15] показав, що в існуючій методології прогнозів підтоплення і дренажу у різних авторів фактично відсутній облік впливу конструкцій і технологій будівництва.

У той же час з'явилися нові та оригінальні розробки укріплювальних конструкцій, в тому числі збірні ґратчасті, гнучкі асфальтобетонні і залізобетонні, із застосуванням геотекстилю та геоконтейнерів і ряд інших. Початок узагальнення різних типів укріплень покладено в роботах [16, 17]. Однак науково обґрунтоване рішення даної проблеми з розробки та вдосконалення нових конструкцій пов'язане з необхідністю формування теоретичних і концептуальних основ проектування укріплювальних споруд. Початок вироблення таких основ належить автору роботи [13].

Таким чином, результати літературного аналізу дозволяють зробити висновок про те, що використання протифільтраційних завіс може мати більш широкий спектр використання, завдяки моделюванню їх параметрів.

5. Методи досліджень

Використані математичні методи (аналітичне розв'язання диференціальних рівнянь фільтрації із залученням комп'ютерної програми Maple) для математичного моделювання параметрів протифільтраційної завіси. А також методи еколого-економічної оцінки та порівняльного аналізу для визначення вагомих факторів впливу на РГВ та впливу РГВ на довкілля.

Запропоновано розташування протифільтраційної завіси (рис. 4) вздовж автошляху для захисту дорожнього полотна від шкідливої дії ґрунтових вод.

Було вирішено стаціонарну задачу визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу.

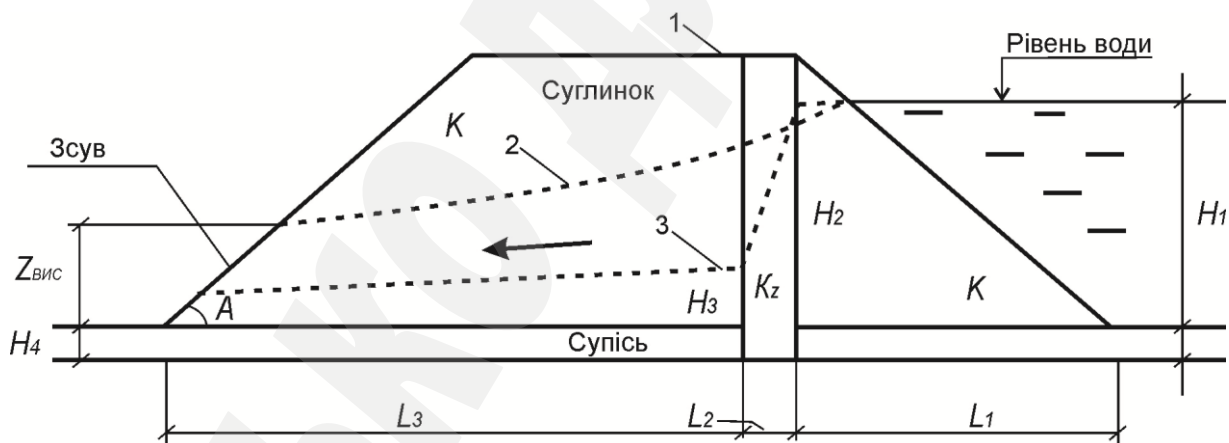


Рис. 4. Схема поперечного перерізу ґрунтового насипу меліорованих територій: 1 – протифільтраційна завіса; 2 – крива депресії без завіси; 3 – те ж із завісою

Отримані формули для послідовного розрахунку напорів на стінках завіси:

$$H_2 = \sqrt{\frac{H_4^2 + \frac{H_4^2 \cdot L_3}{L_1} \cdot \left(1 + \frac{K \cdot L_2}{K_z \cdot L_3}\right)}{1 + \frac{L_3}{L_1} \left(1 + \frac{K \cdot L_2}{K_z \cdot L_3}\right)}}; \quad (1)$$

$$H_3 = \sqrt{H_4^2 + \left(H_1^2 - H_2^2 \cdot \frac{L_3}{L_1} \right)}, \quad (2)$$

де H_2 і H_3 , – напори на стінках завіси, м; H_1 і H_4 . – напори без завіси, м; L_2 – довжина завіси, м; L_1, L_3 – відстань до завіси, м; K_z – коефіцієнт фільтрації завіси; K – коефіцієнт фільтрації ґрунту. Спочатку визначені H_2 , а потім H_3 . Далі знаходиться фільтраційна витрата по Дюпюї:

а) крізь завісу:

$$Q_z = \frac{K_z \cdot (H_2^2 - H_3^2)}{2L_2}, \quad (3)$$

де Q – фільтраційна витрата, м³/с.

б) крізь насип без завіси:

$$Q = \frac{K \cdot (H_1^2 - H_4^2)}{2(L_1 + L_2 + L_3)}. \quad (4)$$

Таким чином, стаціонарну задачу визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу розв'язано.

Для моделювання ефективності встановлення протифільтраційної завіси отримано формули для обчислення глибини протифільтраційної завіси та її впливу на фільтраційні витрати по Дюпюї, та на висоту ділянки височування.

6. Результати дослідження

Досліджено глибину протифільтраційної завіси при різних параметрах (рис. 5):

1. При різних коефіцієнтах фільтрації $K_\phi=0,1; 0,2; 0,3$ $L_1=L_2=L_3=1$; $H_1=1$, $H_4=10$.

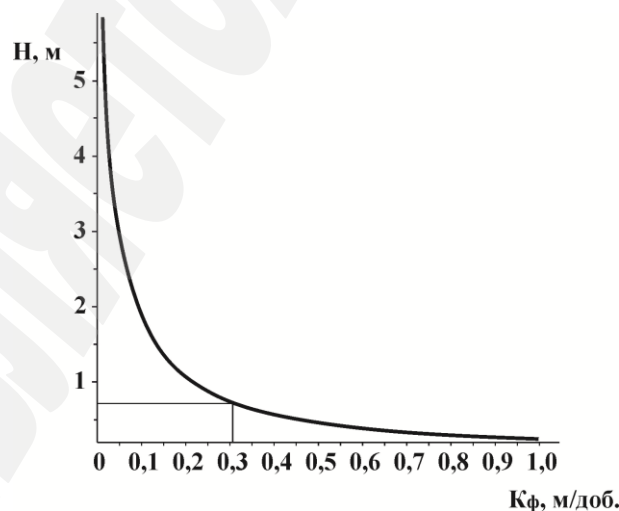


Рис. 5. Глибина протифільтраційної завіси при різних коефіцієнтах фільтрації: H – глибина завіси, м; K_ϕ – коефіцієнт фільтрації, м/доб

При $K_{\phi} > 0,3$ м/доб, в протифільтраційній завісі значно знижується ефективність, при цьому її глибина стає несуттєвим параметром.

2. У другому варіанті розрахунків було подовжено довжину завіси до 10 м (рис. 6) при $L_1=1$; $L_2=0,1$; $L_3=1$; $H_1=10$; $H_4=1$.

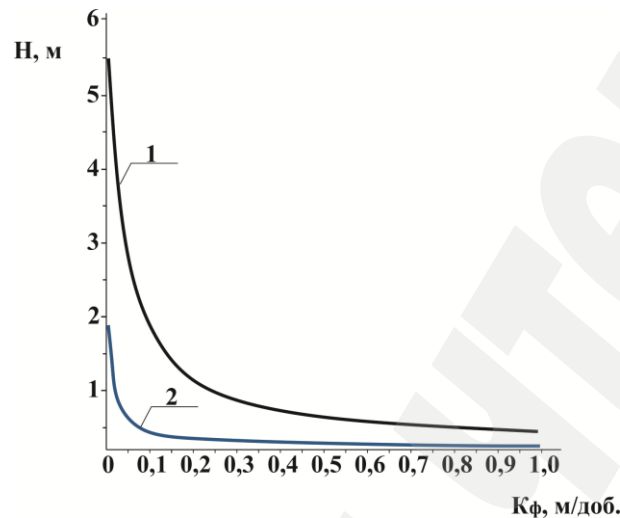


Рис. 6. Глибина протифільтраційної завіси при різних коефіцієнтах фільтрації та довжині: H – глибина завіси, м; K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації, м/доб; 1 – вихідний варіант розрахунку (рис. 5); 2 – подовжено довжину завіси

Таким чином, з рис. 6 видно, що, чим довша завіса, тим менше необхідно її заглиблювати. Досліджено прямопропорційну залежність глибини завіси від її довжини.

На рис. 7 наведено графіки витрат із завісою та без неї.

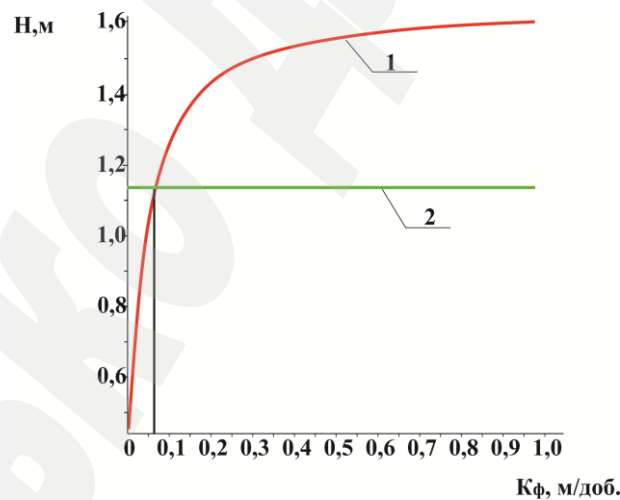


Рис. 7. Графік витрат із завісою та без неї: Q – витрата води, м³/с; K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації, м/доб; 1 – витрата води із завісою; 2 – витрата води без завіси

З рис. 7 бачимо, що завіса ефективна при $K_{\phi} < 0,1$ м/доб.

На рис. 8 представлений випадок, коли було збільшено довжину завіси до 10 м.

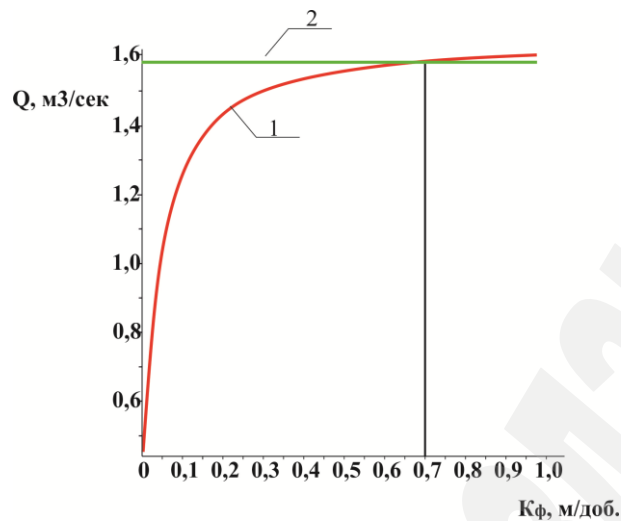


Рис. 8. Графік витрат із завісою та без неї з довжиною завіси $L=10$ м:
 Q – витрата води, м³/с; K_ϕ – коефіцієнт фільтрації, м/доб; 1 – витрата води із завісою; 2 – витрата води без завіси

З рис. 8 бачимо, що навіть з $K_\phi \leq 0,7$ м/доб та подовженій довжині завіси, її використання є ефективним.

З рівняння руху рідкого середовища Полубарінової-Кочіної [11], було отримано рівняння Дюпюї, яке використано для рішення стаціонарної задачі визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу. Далі, згідно формул (1)–(4) [18], було розв’язано стаціонарну задачу визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу. Встановлено, що використання протифільтраційної завіси є ефективним навіть при $K_\phi \leq 0,7$ м/доб, та при більшій довжині та меншому заглибленні самої завіси.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Обґрунтовано дію додаткового техногенного навантаження від впливу автошляху та зрошувальних полів на річні зміни рівнів ґрунтових вод. Запропоновано розташування протифільтраційної завіси вздовж автошляху для захисту дорожнього полотна від шкідливої дії ґрунтових вод. Було вирішено стаціонарну задачу визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу та визначено параметри протифільтраційних завіс для попередження підтоплення автодоріг. Це дозволить використовувати протифільтраційні завіси в різних галузях для захисту від підтоплення різноманітних господарських об’єктів.

Weaknesses. Розрахунки на моделі показали, що використання протифільтраційних завіс впливає, але не дуже інтенсивно на зниження фільтраційної витрати.

Opportunities. Локальне використання протифільтраційних завіс можливе також для захисту будівельних об’єктів від шкідливої дії ґрунтових вод на забудованих територіях.

Більш ефективним засобом збереження автошляхів може бути облаштування дренажу в низовій частині насипу доріг. Цей захід забезпечить повне перехоплення фільтраційного потоку із усуненням ділянок височування та зсувів.

Threats. Прокладання доріг та підтримка їх в робочому задовільному стані займає багато зусиль, часу та фінансування. В Україні проблему бездоріжжя прийнято вирішувати, коли дорожній рух стає вже неможливим, особливо це стосується доріг міжміського сполучення. Майже всі обласні автошляхи стають непридатними для проїзду, особливо ті, що ведуть до віддалених і гірських сіл, де дорога – це єдине, що з'єднує ці населені пункти з районним центром. Дорожню галузь фінансують за залишковим принципом та на дорозі дослідження та прогнозування змін рівнів ґрунтових вод коштів зазвичай не вистачає. Для збереження доріг та попередження їх підтоплення необхідний постійний контроль за станом РГВ, водними об'єктами, зрошувальними полями та господарськими об'єктами поблизу автошляхів та прогноз їх змін [19, 20].

8. Висновки

1. Виявлено, що глибина залягання РГВ на ділянці досліджень не завжди корелює з кількістю атмосферних опадів. Зокрема в період з 2011 по 2014 рр. РГВ знижується на 0,2 м, а потім підвищується на 0,1 м, при цьому кількість опадів залишалась незмінною. Це можна пояснити дією додаткового техногенного навантаження від впливу автошляху та зрошувальних полів на річні зміни рівнів ґрунтових вод. Тобто, техногенні фактори впливу на цій ділянці переважають природні.

2. Запропоновано інженерний захід для захисту дорожнього полотна від шкідливої дії ґрунтових вод, що передбачає встановлення протифільтраційної завіси вздовж автошляху. Проведене математичне моделювання параметрів протифільтраційних завіс, яке дозволить ефективно використовувати протифільтраційні завіси в боротьбі з підтопленням.

3. Рівняння руху рідкого середовища Полубарінової-Кочіної, було отримано рівняння Дюпюї, яке використано для рішення стаціонарної задачі визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу. Далі, згідно [18], було розв'язано стаціонарну задачу визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу. Встановлено, що використання протифільтраційної завіси є ефективним навіть при таких параметрах: $K_{\phi} \leq 0,7$ м/доб, при більшій довжині та меншому заглибленні самої завіси.

Література

1. Olshanska I., Rudyi M., Pedan V. *Monitorynh pidzemnykh vod na terytoriyi Sumskoi ta Kharkivskoi oblastei. Zvedenyi informatsiynyi zvit Kharkivskoi kompleksnoi heolohichnoi ekspedytsii za 2006–2015 rr.* 2016. 256 p.
2. Serikova E. N., Yakovlev V. V. *Dopolnitel'naya infil'traciya v podzemnye vody na territorii krupnyh gorodov (na primere g. Har'kova) // Kommunal'noe hozyaystvo gorodov.* 2011. P. 344–348.
3. *Pravyla No. 190 vid 1997-09-26. Tekhnichni pravyla remontu ta utrymanna avtomobilnykh dorih zahal'nogo korystuvannya Ukrainy P-H.1-218-113-97.*
4. *RSFSR. 20.03,79 g. Tekhnicheskie ukazaniya. po ukrepleniyu obochin. avtomobil'nyh dorog. VSN 39-79.*
5. *ODN 218.3.039-2003 (utv. rasporyazheniem Mintransa RF ot 23.05.2003 N OS-461-r).*

6. Razvitie podtopleniy vdol' nasypnyh dorog v usloviyah lesotundry Zapadnoy Sibiri / Milyaeva E. V. et. al. // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. Issue 365. P. 206–211.
7. Sologaev V. I. Zashchita ot podtopleniya v gorodskom stroitel'stve. Ustroystvo i rabota. Omsk: SibADI, 1999. 56 p.
8. Aver'yanov V. N. Evaluation of the Impermeability of a Curtain Formed from Alluvial Clayey Loams Based on Study of the Microstructure of the Soil and Filtration Investigations // Power Technology and Engineering. 2014. Vol. 47, Issue 5. P. 326–331. doi: <https://doi.org/10.1007/s10749-014-0447-4>
9. Mordvintsev K., Alwahab Y. A. Evaluation of the Effectiveness of the Creation of Antifiltration Curtains in Hydroelectric Power Plant in Syria // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. P. 634–639. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_67
10. Bruce D. A., Dreese T. L., Heenan D. M. Concrete walls and grout curtains in the twenty-first century: the concept of composite cut-offs for seepage control // USSD 2008 Conference. Portland, 2008. 35 p.
11. Polubarinova-Kochina P. Ya. Teoriya dvizheniya gruntovyh vod. Moscow: Nauka, 1977. 664 p.
12. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnyh plastah. Moscow: Nedra, 1984. 211 p.
13. Perevoznikov B. F. Zashchita avtomobil'nyh dorog ot opasnyh gidrometeorologicheskikh processov i yavleniy. Moscow: Informavtodor, 1993.
14. Prognozy podtopleniya i raschet drenazhnyh sistem na zastraivaemyh i zastroennyh territoriyah: sprav. pos. / Muftahov A. Zh. et. al. Moscow: Stroyizdat, 1991. 272 p.
15. Rudakov V. K. Metody prognoznyh raschetov vliyaniya orosheniya na rezhim gruntovyh vod // Voprosy gidrogeologicheskikh prognozov v svyazi s irrigatsiey zemel' i vodosnabzheniem. Trudy Dnepropetrovskogo gosudarstvennogo universiteta. 1970. Issue 3. P. 123–127.
16. L'vovich Yu. M. Sovremennye konstrukcii i metody ukrepleniya na ob'ektah dorozhno-mostovogo stroitel'stva. Moscow: CBNTI Minavtodora RSFSR, 1980. 69 p.
17. L'vovich Yu. M., Motylev Yu. L. Ukreplenie otkosov zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog. Moscow: Transport, 1979. 199 p.
18. Zolotarev N. V. Modelirovanie podtopleniya i drenirovaniya melioriruemyyh landshaftov metodom elektronnyh tablic s cel'yu prognozirovaniya ih sostoyaniya: Abstract's PhD thesis. Omsk, 2013. 22 p.
19. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City // International Journal of Development Research. 2015. Vol. 5, Issue 12. P. 6236–6240.
20. Serikova E. N., Yakovlev V. V. Rol' upravlencheskih metodov v predotvrashchenii podtopleniya gorodov // Naukovyi visnyk budivnytstva. 2012. Issue 68. P. 382–387.