



ГІДРОТЕХНІКА

УДК 626.862.3

<https://doi.org/10.31713/vt420183>

Клімов С. В., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ В ДРЕНАЖНО-ЕКРАННОМУ МОДУЛІ ПРИ ГЛИБОКОМУ ЗАЛЯГАННІ ВОДОУПОРУ І РОЗМІЩЕННІ ЕКРАНУ БЕЗПОСЕРЕДНЬО БІЛЯ ДРЕНИ

З моменту будівництва осушувальних дренажних систем вони знижують рівень ґрунтових вод не тільки території осушуваного масиву, але й виснажують водні горизонти прилеглих територій. Розміщення поруч з дренаєм водонепроникного полімерного екрану (ПФЕ) дозволяє перерозподілити зони впливу дрени. В даній статті розглядається математичне моделювання часткового випадку розміщення ПФЕ безпосередньо біля крайньої дрени осушувальної системи. При нехтуванні впливу місцевого водоупору (глибоке залягання водоупору), дослідження руху фільтраційного потоку до дрени з ПФЕ проводиться на основі відомого рівняння характеристичної функції течії Ф.Б. Нельсона-Скорнякова. Рішення отриманої системи нелінійних рівнянь з достатньою точністю були отримані з використанням функції Minerr в системі Mathcad. Отримані результати підтверджують нелінійне збільшення ефективності дії ПФЕ при його заглибленні. *Ключові слова:* осушувальна система, обмеження впливу, внутрішньогрунтовий фільтраційний потік, системи нелінійних рівнянь

Будівництво в гумідній зоні осушувальних систем стало суттєвим втручанням людини в природні, збалансовані упродовж тривалого часу умови, що призвело як до кількісних, так і часто до якісних змін багатьох природних компонентів. Пониження рівня ґрунтових вод (РГВ) відбулось як безпосередньо на самій системі, так і на прилеглих до неї територіях, водні горизонти яких поступово виснажуються.

Розмір зон впливу залежить від конструктивних характеристик осушувальних систем та природніх умов території: існуючого РГВ, рельєфу, властивостей ґрунту (водопроникність, водовіддача ін.), зв'язку між ґрунтовими водами масиву, що осушується та прилеглих територій, історичного і створеного направлення потоку ґрунтових

вод, характеристик водоупору (глибина закладання, водопроникність, ін.), наявною рослинністю та ін. [1].

Інтенсивність пониження РГВ прилеглих територій залежить від наступних конструктивних параметрів «класичних» осушувальних систем: глибина водоприймача і осушувачів, їх довжини, відстані між ними та ряду інших параметрів.

За даними досліджень [2] розмір зони впливу носять пульсуючий характер (збільшується в посушливі роки й зменшується у вологі) і співставимі з розмірами площ осушення. Наприклад, коли прилегла територія складена пісками або супісками, то при пологих схилах і глибині дренажу 1,5-2,5 м, ширина зони впливу через 10 років після будівництва осушувальної системи сягає 1-1,2 км. При близькому розміщенні декількох меліоративних систем зони впливу накладаються і збільшуються до 3-6 км [2].

Дане дослідження виконане згідно з науковою темою «Вдосконалення будівництва та експлуатації водогосподарських систем і природоохоронних об'єктів, раціональне використання водних ресурсів», № держреєстрації 0114U001364 та відповідає Закону України від 14.01.2000р. № 1389-XIV «Про меліорацію земель», зокрема, розділу IX, статті 31 Екологічні вимоги до проектування, будівництва (реконструкції) і експлуатації меліоративних систем та окремих об'єктів інженерної інфраструктури, а також Закону України № 4836-VI від 24 травня 2012 року «Про затвердження Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року», в частині Завдання і заходи Програми – «забезпечення розвитку меліорації земель і поліпшення екологічного стану зрошуваних та осушених угідь, управління водними ресурсами, реконструкція і модернізація інженерної інфраструктури меліоративних систем із створенням цілісних технологічних комплексів, інженерний захист від підтоплення сільськогосподарських угідь і населених пунктів, розташованих у межах меліорованих територій, а також забезпечення сталого функціонування та екологічної безпеки меліоративних систем».

З метою зменшення негативного впливу на прилеглі території, в процесі проектування нових або під час модернізації чи реконструкції існуючих гідромеліоративних систем (ГМС), в НУВГП розроблена удосконалена конструкція огорожувальної мережі, або крайніх дрен регулюючої мережі у вигляді дренажно-екранних модулів (ДЕМ) [3]. Розміщення поруч з дренаєм в складі ДЕМ водонепроникного (про-



тифільтраційного) полімерного екрану (ПФЕ) дозволяє перерозподілити зони впливу дрени: збільшити вплив дрени (стік) з боку системи і зменшення з боку довкілля.

ПФЕ в складі ДЕМ збільшує довжину ліній току при надходженні внутрішньогрунтового фільтраційного потоку до дрени і створює біля дрени верхній і нижній б'єфи. Таким чином, ґрунтова вода, яка надходить з боку прилеглих територій рухається під впливом різниці напорів у верхньому і нижньому (напірного й підпірного) б'єфах. З боку меліорованої ділянки вода до дрени надходить без перешкод.

Рух ґрунтової води до дрени ламінарний і узгоджується із законом Дарсі, крім цього він є усталений, нерівномірний, тобто характеризується наявністю криволінійних живих перетинів. В різних точках швидкість фільтрації U буде різною, як за величиною, так і за напрямком [4]. У зв'язку з цим, якщо розглядати випадок плоскої задачі і використовувати диференціальні рівняння Дарсі, швидкість фільтрації ґрунтової води в довільній точці A буде визначатись системою рівнянь у диференціальній формі. Оскільки гідрометричний тиск у різних точках ґрунту буде різним, то третім рівнянням є рівняння нестискуваності рідини в диференціальній формі. Таким чином система рівнянь для трьох величин U_x , U_y , P є основним диференціальним рівнянням усталеного руху ґрунтової води

$$\left. \begin{aligned} U_x &= -k \frac{\partial H}{\partial x}; \\ U_y &= -k \frac{\partial H}{\partial y}; \\ \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для знаходження основних параметрів плоского потенціального безвихрового руху рідини теоретичним шляхом застосовуються рівняння Лапласа. Для цього необхідно знайти характеристичну функцію потоку

$$z = f(W) = F\{\varphi(x, y) + i \cdot \psi(x, y)\}. \quad (2)$$

Існує декілька методів визначення функцій $\varphi(x, y)$ та $\psi(x, y)$, які є відповідно потенціалом швидкостей та функціями руху потоку. Такими методами є метод прямого рішення диференціального рівняння Лапласа (так званий метод кінцевих різниць), метод Фур'є (побудови аналітичних функцій), метод аналітичної теорії диференціальних рів-

нянь, метод інтегральних рівнянь та метод конформних відображень [5]. Ці методи відносяться до гідромеханічних «точних» методів.

Для розв'язання завдань винайдення функцій руху плоского ґрунтового потоку в обхід певних перешкод найчастіше застосовується метод конформних відображень, який складається з відшукування для досліджуваної області руху ґрунтової води області комплексної швидкості

$$\frac{dW}{dz} = Vx - i \cdot Vy, \quad (3)$$

або області комплексу Н.Е. Жуковського

$$G = Z - \frac{i \cdot W}{k}, \quad (4)$$

які конформно відображуються на область комплексного потенціалу руху

$$W = \varphi(x, y) + i \cdot \psi(x, y), \quad (5)$$

певною аналітичною функцією, яка і буде характеристичною функцією руху потоку [6].

Якщо в складній області фільтрації можна провести лінії, наближені до ліній рівних напорів, які розділяють область фільтрації на окремі частини-фрагменти, форми яких достатньо прості і для яких можуть бути отримані точні рішення, може бути застосований "наближений" метод фрагментів [7; 8].

В реальних умовах можна виділити декілька гідрогеологічних умов, які існують на ГМС і прилеглих територіях за умови, що ґрунт як прилеглих територій, так і самої меліоративної системи є однорідний та підстиляється менш проникним ґрунтом (місцевим водоупором) із різним ступенем впливу на гідрологічну ситуацію місцевості:

1) водоупор розташований на значній глибині і не впливає на формування РГВ території ($T=30-100$ м та більше, $B/T > 3$, для роботи ДЕМ – $D_{\text{пфЕ}} / T \leq 0,1$ та $T / E_1 \geq 5$ (рис. 2) [9]).

2) водоупор розташований на незначній глибині і частково впливає на формування РГВ території ($T < 30$ м, $B/T \approx 3$, $D_{\text{пфЕ}} / T \leq 0,4$ та $T / E_1 \geq 3$).

3) Близько розташований водоупор, який суттєво впливає на формування РГВ території ($T < 10$ м, $B/T < 3$, $D_{\text{пфЕ}} / T > 0,4$ та $T / E_1 < 3$).

В даних умовах: T – відстань до водоупору, м; B – відстань між дренами, м; $D_{\text{ПФЕ}}$ – глибина закладання нижнього краю протифільтраційного екрана, м; E_1 – відстань від дренажа до ПФЕ, м.

В даній статті розглядається частковий випадок розміщення ПФЕ безпосередньо біля крайньої дренажної осушувальної системи при дослідженні руху фільтраційного потоку до дренажа з протифільтраційним екраном при глибокому заляганні водоупору. При цьому область фільтрації обмежена контуром $OABCD$ (рис. 1). Ґрунтовий потік має вільну поверхню AB , обтікає ПФЕ по контуру BCD і надходить до дренажу DO .

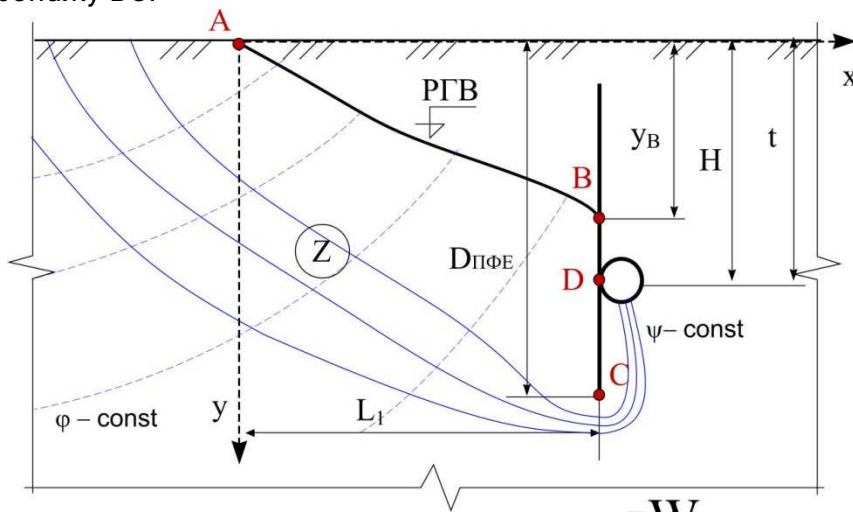


Рис. 1. Розрахункова схема ДЕМ при глибокому водоупорі і ПФЕ влаштованого біля дренажа

Ф.Б. Нельсон-Скорняков [10] пропонує наступне рішення рівняння характеристичної функції течії

$$z = -\frac{i}{k}W + iL_1 \frac{\sin \frac{\pi W}{2kH}}{\sin \frac{\pi y_B}{2H}} \sqrt{\sin^2 \frac{\pi y_B}{2H} - \sin^2 \frac{\pi W}{2kH}}, \quad (6)$$

звідки рівняння вільної поверхні AB

$$x = L_1 \frac{\sin \frac{\pi y}{2H}}{\cos \frac{\pi y_B}{2H}} \sqrt{\sin^2 \frac{\pi y}{2H} - \sin^2 \frac{\pi y_B}{2kH}}, \quad (7)$$

де $y_B \leq y \leq H$.

Глибина ПФЕ (відносно дрени) буде визначатись рівнянням [11]

$$D_{\text{ПФЕ}} = L_1 \sin \frac{\pi W e}{2kH} \cdot \sqrt{a} - \frac{W e}{k} + H, \quad (8)$$

де параметр a визначається з рівняння

$$L_1 = H \frac{\sqrt{a}}{\pi \cdot \cos \frac{\pi y_B}{2H} \cdot \left[a - \frac{1}{2} \tan \left(\frac{\pi y_B}{2H} \right) \right] \cdot \sqrt{1+a}}. \quad (9)$$

Рішення отриманої системи нелінійних рівнянь з достатньою точністю можна отримати з використанням функції Мінегг в системі Mathcad. Для цього спочатку задаються відомі значення величин a також наближені (прогнозовані) значення параметрів, які нам невідомі. Для нашого випадку відомі значення параметрів:

$D = D_{\text{ПФЕ}}$ – глибина закладання нижнього краю протифільтраційного екрана, ($D = 0,1; 0,5; 0,75; 1,0; 2,0; 5,0; 8,0$ м);

H – глибина рівня ґрунтових вод, ($H = 1,5$ м);

L_1 – відстань до виходу РГВ на денну поверхню (рівень H) (задаємо $L_1 = 20$ м),

Також проводимо заміну відношення комплексного потенціалу руху до коефіцієнта фільтрації ґрунту на певну змінну $C = \frac{W}{k}$.

Наближені значення параметрів, які будуть знаходитись:
 $y_c := 0.12971$, $a := 0.01196$, $C := 0.07765$.

Вимоги до введення початкових наближених значень – значення мають бути:

- близькі до очікуваних коренів рівнянь;
- такими, щоб вираз не мав локальних max і min між початковим наближенням і коренями рівнянь;
- щоб вираз не мав розривів між початковими наближеннями і коренями рівнянь.

Створений блок має наступний вигляд

Given

$$D = L_1 \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot C}{2 \cdot H} \right) \cdot \sqrt{a} - C$$



$$L_1 = \frac{\sqrt{a}}{\pi \cdot \cos \frac{\pi y_B}{2H} \cdot \left[a - \frac{1}{2} \cdot \left(\tan \left(\frac{\pi y_B}{2H} \right) \right)^2 \right] \cdot \sqrt{1+a}} \cdot H . \quad (10)$$

$$\cos \left(\frac{\pi \cdot C}{2 \cdot H} \right) = \sqrt{1+a} \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot y_B}{2 \cdot H} \right)$$

$$\text{Minerr}(y_c, a, C) = \begin{pmatrix} 0.12971 \\ 0.01196 \\ 0.07765 \end{pmatrix} .$$

За результатами рішення системи рівнянь визначено, зокрема, залежність напору на ПФЕ з боку довкілля від глибини закладання ПФЕ, яка представлена на рис. 2.

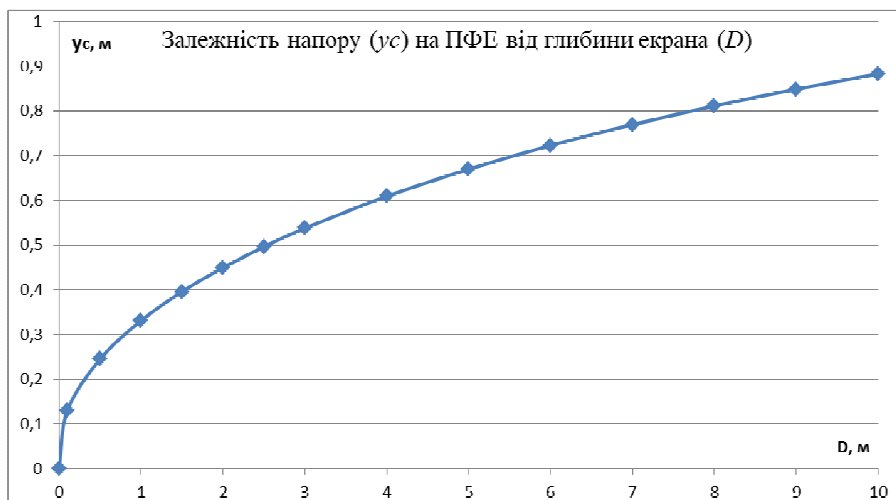


Рис. 2. Залежність напору на ПФЕ з боку довкілля y_B від глибини ПФЕ $D_{\text{ПФЕ}}$ ($L=20$ м, $H=1.5$ м)

З рис. 2 видно, що із зростанням глибини екрана $D_{\text{ПФЕ}}$ напір на нього y_B збільшується, тобто положення т. В (див. рис. 1) підвищується. Більш інтенсивно зростає напір на початковому етапі (при збільшенні $D_{\text{ПФЕ}}$ від 0 до 2 м напір y_B збільшується з 0 до 0,45 м), а далі інтенсивність зростання напору при заглибленні ПФЕ поступово зменшується.

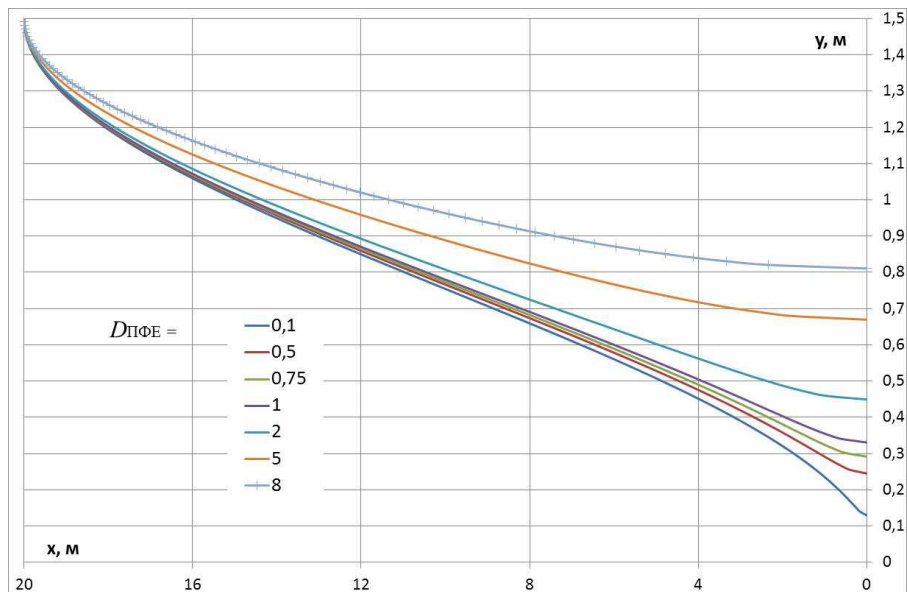


Рис. 3. Положення кривої депресії при різних глибинах ПФЕ, $D_{\text{ПФЕ}}$ (L=20 м, H=1.5 м)

Отже використання характеристичної функції течії Ф.Б. Нельсона-Скорнякова в зоні дії дренажно-екранного модуля з розміщенням ПФЕ безпосередньо біля дрени та при глибокому заляганні водоупору дозволяє визначити залежність створення підпору протифільтраційним екраном від глибини закладання нижнього краю ПФЕ. Дана модель є частковим випадком, який виникає при інфільтраційному режимі живлення основної площі після скидання частини води в навколодренній зоні. В статті наведено рішення отриманої системи нелінійних рівнянь з використанням функції Minerr в системі Mathcad. Отримані результати підтверджують нелінійне збільшення ефективності дії ПФЕ при його заглибленні. Залежність для заданих умов $y_c = 0,3365 \cdot D^{0,4152}$ з величиною достовірності апроксимації $R^2=0.999$.

1. Рекомендации по гидрогеологическому обоснованию зон влияния осушения при проектировании мелиоративных систем и охранных зон заповедных территорий. Киев : УКРГИПРОВОДХОЗ, 1984. 32 с. 2. Маслов, Б. С., Минаев, И. В. Мелиорация и охрана природы. М. : Россельхозиздат, 1985. 271 с. 3. Клімов С. В. Реконструкція гідромеліоративних систем зони надмірного зволоження з використанням дренажно-екранних модулів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2014. № 1(65). С. 45–50. 4. Хрисанов, Н. И., Камбуров В. А. Условия надежности закрытого дренажа. М. : Колос, 1978. 86 с.



5. Лаврик, В. И., Савенков, В. Н. Справочник по конформным отображениям. Киев : Наукова думка, 1970. 252 с. **6.** Нельсон-Скорняков, Ф. Б. Расчет движения грунтовых вод через земляные плотины. М. : Изд-во ВАСХНИЛ, 1936. 159 с. **7.** Аравин В. И., Носова О. Н. Натурные исследования фильтрации. Л. : Энергия, 1969. 256 с. **8.** Климов, С. В., Пинчук, О. Н. Реконструкция гидро-мелиоративных систем зоны избыточного увлажнения с локализацией их действия. *Сборник научных трудов. Проблемы управления водными и земельными ресурсами* : материалы Международного научного форума. Москва, 30 сентября 2015 г. Ч. 1. М. : ФГБОУ ВПО МГУП. 2015. С. 320–327. **9.** Павловский, Н. Н. Движение грунтовых вод. М.- Л. : Изд-во АН СССР, 1956. 772 с. **10.** Нельсон-Скорняков, Ф. Б. Фильтрация в однородной среде. М. : Советская наука, 1949. 568 с. **11.** Клімов С. В. Локалізація впливу осушувальних систем застосуванням дренажно-екранних модулів : монографія. Рівне : НУВГП, 2018. 249 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/9218> (дата звернення: 26.04.2019).

REFERENCES:

1. Rekomendatsii po hidroheolohicheskomu obosnovaniiu zon vliianiia osusheniia pri proektirovanii meliorativnykh sistem i okhrannykh zon zapovednykh territorii. Kyev : UKRHIPROVODKHOZ, 1984. 32 s. **2.** Maslov, B. S., Minaev, I. V. Melioratsiia i okhrana prirody. M. : Rosselkhozizdat, 1985. 271 s. **3.** Klimov S. V. Rekonstruktsiia hidromeliorativnykh system zony nadmirnoho zvolozhennia z vykorystanniam drenazhno-ekrannykh moduliv. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Tekhnichni nauky*. 2014. № 1(65). С. 45–50. **4.** Khrisanov, N. I., Kamburov V. A. Usloviia nadezhnosti zakrytoho drenazha. M. : Kolos, 1978. 86 s. **5.** Lavrik, V. I., Savenkov, V. N. Spravochnik po konformnym otobrazheniiam. Kyev : Naukova dumka, 1970. 252 s. **6.** Nelson-Skorniakov, F. B. Raschet dvizheniia hruntovykh vod cherez zemlianye plotiny. M. : Izd-vo VASKhNIL, 1936. 159 s. **7.** Aravin V. I., Nosova O. N. Naturnye issledovaniia filtratsii. L. : Enerhiia, 1969. 256 s. **8.** Klimov, S. V., Pinchuk, O. N. Rekonstruktsiia hidromeliorativnykh sistem zony izbytochnoho uvlazhneniia s lokalizatsiei ikh deistviia. *Sbornik nauchnykh trudov. Problemy upravleniia vodnymi i zemelnymi resursami* : materialy Mezhdunarodnoho nauchnoho foruma. Moskva, 30 sentiabria 2015 h. Ch. 1. M. : FHBOU VPO MHUP. 2015. С. 320–327. **9.** Pavlovskii, N. N. Dvizhenie hruntovykh vod. M.-L. : Izd-vo AN SSSR, 1956. 772 s. **10.** Nelson-Skorniakov, F. B. Filtratsiia v odnorodnoi srede. M. : Sovetskaia nauka, 1949. 568 s. **11.** Klimov S. V. Lokalizatsiia vplyvu osushivalnykh system zastosuvanniam drenazhno-ekrannykh moduliv : monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2018. 249 s. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/9218> (data zvernennia: 26.04.2019).

Рецензент: д.т.н., професор Ткачук М. М. (НУВГП)

Klimov S. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

MATHEMATICAL MODELING OF THE FILTRATION PROCESS IN DRAINAGE-SCREENED MODULE AT DEEP AQUICLUDE AND SCREEN PLACEMENT DIRECTLY NEAR DRAINS

After the construction of drainage systems, they reduce the level of ground water not only the area of the drained array, but also deplete the water horizons of the adjoining areas. In order to reduce the negative impact on the adjacent territory, in the process of designing new or during modernization or reconstruction of existing drainages systems, developed has been in National University of Water Management and Nature Management an improved design of the boundary drainage system or the end drainage tube of the regulatory network in the form of drainage-screened modules. Placement next to a drainage a waterproof polymeric screen (anti-filtration screen (AFS)) allows you to redistribute zones of influence of this drainage. In this article we consider the mathematical modeling of a partial case of placement of AFS directly next to drainage tube on the end of the drainage system. In neglecting the influence of the deep aquiclude, the study of the motion of the filtration flow to the drain with AFS is carried out on the basis of the known equation of the characteristic flow function of F.B. Nelson-Skorniyakov. The solution of the resulting system of nonlinear equations with sufficient accuracy was obtained using the Minerr function in the Mathcad system. The requirements for entering initial approximation values are given, in particular the values should be close to the expected roots of the equations, and the interval had no gaps and local max and min. The obtained results confirm the nonlinear increase in the effectiveness of AFS in its deepening. The resistance of the groundwater flow is increased more intensively at the initial stage (when the bottom edge is deepened from 0 to 2 m, the resistance increases from 0 to 0.45 m), and then the intensity of the increase in pressure gradually decreases.

***Keywords:* drainage system, limitation of influence, filtration flow, systems of nonlinear equations.**



Климов С. В., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ В ДРЕНАЖНО-ЭКРАННОМ МОДУЛЕ ПРИ ГЛУБОКОМ ЗАЛЕГАНИИ ВОДОУПОРА И РАЗМЕЩЕНИИ ЭКРАНА НЕПОСРЕДСТВЕННО У ДРЕНЫ

С момента строительства осушительных дренажных систем они снижают уровень грунтовых вод не только территории осушаемого массива, но и истощают водные горизонты прилегающих территорий. Размещение рядом с дренажной водонепроницаемой полимерной экранной (ПФЭ) позволяет перераспределить зоны влияния дренажной. В данной статье рассматривается математическое моделирование частного случая размещения ПФЭ непосредственно у крайней дренажной осушительной системы. Если не учитывать влияния местного водоупора (его глубокое залегание), исследование движения фильтрационного потока в дренажной с ПФЭ можно проводить на основе известного уравнения характеристической функции течения Ф.Б. Нельсона-Скорнякова. Решение полученной системы нелинейных уравнений с достаточной точностью были получены с использованием функции Minerr в системе Mathcad. Полученные результаты подтверждают нелинейное увеличение эффективности действия ПФЭ при его углублении.

Ключевые слова: осушительная система, ограничение влияния, внутрипочвенный фильтрационный поток, системы нелинейных уравнений.
