

Д.В. Рудаков, к.т.н., с.н.с.  
І.О. Садовенко, д.т.н., проф.  
Національній гірничій університет

### ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ ПРИ ВІДПРАЦЬОВУВАННІ Й ЗАТОПЛЕННІ ШАХТНОГО ПОЛЯ

*Розроблено методику розрахунку параметрів гідродинамічного режиму шахтного поля, що враховує різні періоди його експлуатації. Структура розроблюваного масиву схематизується за допомогою шарів, що відповідають горизонтам відпрацювання. Розрахований водоприток залежить від динаміки розширення і затоплення виробленого простору. В результаті моделювання показана можливість застосування методики в реальних гірничо-гідрогеологічних умовах.*

**Вступ.** Проблема керування гідродинамічним режимом вугільних шахт є в даний час однією з актуальних для гірничодобувної галузі України. Особливу значущість вона набула в період реструктуризації і закриття шахт, коли їхнє затоплення призводить до підтоплення великих територій, виходу рудникових газів на поверхню землі, інших негативних явищ.

Екологічно і технічно оптимальні рішення щодо організації роботи шахтного дренажу, як при експлуатації, так і при консервації шахт, можуть прийматися тільки на підставі достовірних прогнозів зміни гідродинамічного режиму шахтних полів. Як інструмент такого прогнозування зазвичай використовуються чисельні моделі фільтрації. Їхня вірогідність і ефективність багато в чому залежить від адекватності врахування гірничотехнічних і гідрогеологічних особливостей розроблювальних родовищ. До найбільш важливих факторів, що вимагають ретельного врахування при виконанні прогнозів, належать: змінені фільтраційні властивості зон обвалення, анізотропія тріщинуватих масивів, нерівномірність відпрацювання шарів на різних горизонтах, розгалуженість підземних виробок різних типів, мінливість кутів падіння шарів і т. ін.

Відомі методи чисельного моделювання фільтрації, у тому числі на гірничодобувних підприємствах [1, 2], не повністю враховують перераховані вище чинники, а розрахункові параметри моделей на великій сітці часто не пов'язані зі структурою шахтного поля і процесами, що там відбуваються, які потребують великого масштабування. Просторові моделі фільтрації [3] доцільні для розрахунків в окремій частині шахтного поля або при теоретичному дослідженні особливостей гідродинамічних процесів у підробленому масиві. Їхнє застосування вимагає значної деталізації масиву, що не завжди забезпечено вихідними даними. Крім того, надмірне ускладнення моделей часто не відповідає запитам і вимогам інженерно-технічних рішень, а також точності визначення параметрів. Як певна альтернатива згаданим підходам можуть розглядатися аналітичні методи моделювання фільтрації [4, 5]. Однак їхнє застосування обмежене умовою відносної однорідності шахтного поля.

Оптимальним є застосування квазі-просторових моделей, побудованих на розрахунковій схемі планової несталої фільтрації. При цьому необхідно, з одного боку, адекватно враховувати графік проведення гірничих робіт і неоднорідність масиву. З іншого боку, параметри моделей слід погоджувати з фізикою процесів усередині блоків сітки, уникаючи імітаційного калібрування результатів під час розв'язку зворотних задач. Метою даної роботи є розробка й апробація такої моделі, а також обґрунтування її параметрів на прикладі прогнозу гідродинамічного режиму шахтного поля.

**Схематизація шахтного поля.** Об'єм порожнин у межах шахтного поля  $V$  складається з обсягу тріщин і пор  $V_f$ , а також об'єму виробленого простору  $V_w$ . Об'єм  $V_f$  враховує як природну, так і техногенну тріщинуватість. Зміна параметра  $V_w$  у просторі задається на основі фактичних планів гірничих робіт з урахуванням коефіцієнта заповнення [6].

З метою адекватного відображення фільтраційної неоднорідності й просторового розподілу зон відпрацювання шахтного поля виконується його розбивка на блоки у вигляді прямокутників. На кожному горизонті товщиною  $\Delta z$ , де ведеться відпрацювання, задається загальний об'єм виробленого простору  $V_{w,l}$  ( $l = 1, \dots, N_z$ ,  $N_z$  – число шарів), а також виділяється кілька зон з різними значеннями фільтраційних параметрів і об'ємом виробленого простору. Тоді відповідно до горизонтального розподілу об'єму  $V_w$  по шарах і з урахуванням послідовності відпрацювання для кожного блоку можна задати об'єм виробіток, час їхньої появи і погашення. Виходячи з об'єму  $V_{w,l}$  визначається площа горизонтального перетину виробок  $S_h$  на заданій глибині  $z$  як відношення об'єму порожнин у шарі до його товщини:  $S_h(z) = V_w(z) / \Delta z$  [5].

Приклад такої фільтраційної схематизації показаний на рис. 1 і 2. Наявність зон посиленої інфільтрації (відстійників шахтних вод, знижень рельєфу) моделюється шляхом завдання нерівномірної по площі інтенсивності інфільтраційного живлення  $\epsilon$ .

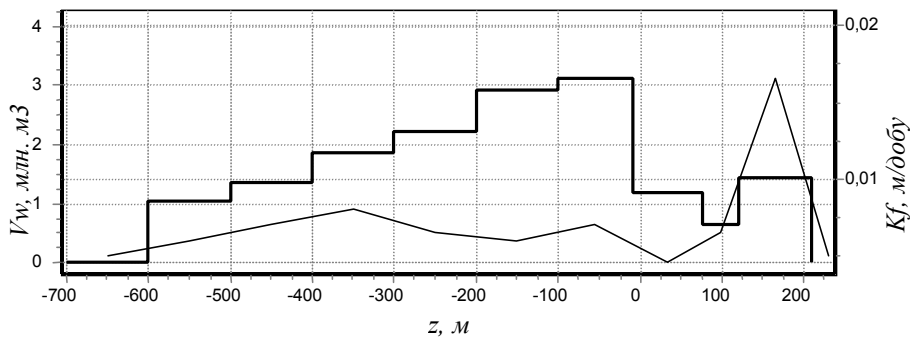


Рис. 1. Розподіл виробленого простору  $V_w$  і середнього коефіцієнта фільтрації  $K_f$  по глибині на різних горизонтах відпрацювання

**Розрахунок гідродинамічного режиму шахтного поля.** В умовах порушення природних геологічних структур при розробці шарів, наявності зон обвалення з підвищеною вертикальною проникністю розрахунок зміни рівня підземних вод доцільно вести на основі рівняння планової несталої фільтрації [7].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q_w - \varepsilon = n_f \frac{\partial H}{\partial t} \tag{1}$$

Тут  $H$  – рівень підземних вод,  $T_x$  і  $T_y$  – водопровідність уздовж осей  $Ox$  і  $Oy$  відповідно,  $n_f$  – тріщинна пористість порід масиву,  $Q_w$  – інтенсивність стоків у виробітку,  $\varepsilon$  – інтенсивність інфільтрації.

У складних гідрогеологічних умовах фільтраційний розрахунок виконується за допомогою чисельних моделей. Для розв’язку рівняння (1) використана попеременно-трикутна схема методу кінцевих різниць, яка поєднує переваги явної схеми зі значною обчислювальною стійкістю [8, 9].

При шаруватій неоднорідності шахтного поля величина  $H$  розглядається як середньомовірнісна висота рівня підземних вод над деякою площиною порівняння  $H_{gl}$ . Як останню доцільно прийняти рівень залягання слабопроникних порід нижче підшви найглибшого горизонту відпрацювання. Більш точне визначення рівня підземних вод у межах блоку сітки вимагає або залучення тривимірних моделей фільтрації, або детального чисельного аналізу на підставі даних про вертикальний розподіл проникності й виробленого простору.

Параметри водопровідності визначаються за формулами:

$$T_x(x, y) = \int_{H_{gl}}^H K_x(x, y, z) dz, \quad T_y(x, y) = \int_{H_{gl}}^H K_y(x, y, z) dz, \tag{2}$$

де  $K_x$  і  $K_y$  – значення коефіцієнта фільтрації уздовж осей  $Ox$  і  $Oy$  відповідно. При пошаровій апроксимації параметра проникності інтегрування у виразах (2) замінюється відповідною сумою.

Особливістю розробленої методики є спосіб розрахунку притоку до виробок згідно з прийнятою схематизацією підробленого масиву. Водопріток до виробок у межах блоку  $(i, j)$  визначається підсумовуванням водопритоків за всіма дренажними горизонтами відпрацювання, число яких дорівнює  $N_{ij}$ :

$$Q_{w,ij} = \sum_{k=1}^{N_{ij}} Q_{w,ijk} \tag{3}$$

Величина  $N_{ij}$  змінюється в міру розробки і дренажування більш глибоких горизонтів і в залежності від положення рівня води в шахтному стовбурі, гідравлічно пов’язаному з виробітками.

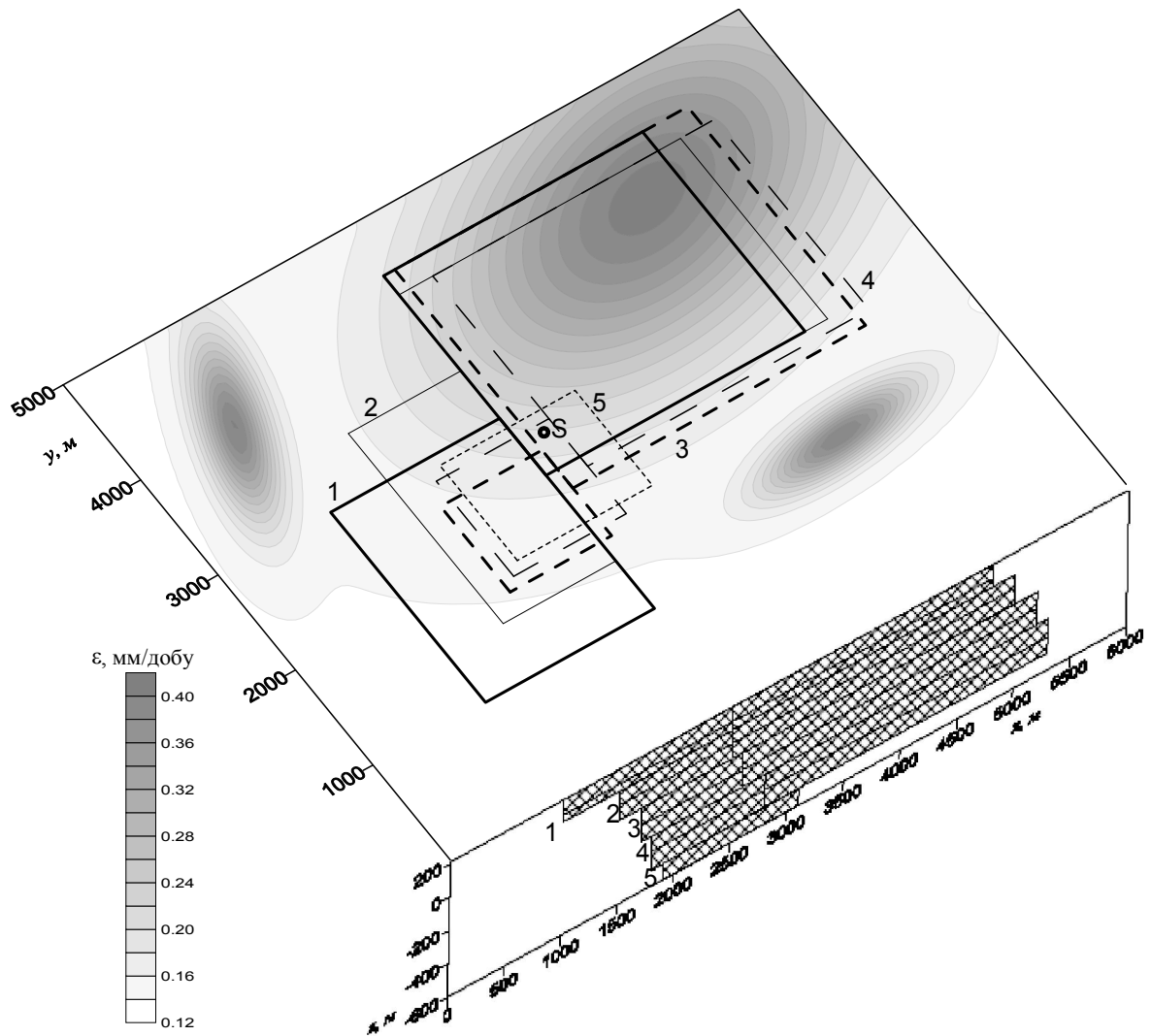


Рис. 2. Розташування горизонтів відпрацювання і джерел інфільтрації в межах шахтного поля. 1, ..., 5 – контури горизонтів відпрацювання на позначках: 1) від 75 до 210 м; 2) від -100 до 75 м; 3) від -300 до -100 м; 4) від -500 до -300 м; 5) від -600 до -500 м; S – шахтний стовбур

Приплив води з оточуючих порід у виробки в блоці на  $k$ -му горизонті відпрацювання можна обчислити за лінійним законом:

$$Q_{w,ijk} = K_{ijk} S_{w,ijk} \frac{\Delta H_{w,ijk}}{L_{a,ijk}}, \tag{4}$$

де  $K_{ijk}$  – коефіцієнт фільтрації на  $k$ -му горизонті в блоці  $(i, j)$ ,  $S_{w,ijk}$  – площа поверхні «виробка–оточуючий масив»,  $\Delta H_{w,ijk}$  – перепад напору у водонасичених породах навколо виробіток і поверхнею стоку,  $L_{a,ijk}$  – середня довжина шляху фільтрації з довільної точки масиву до поверхні виробіток. Параметри, що входять у вираз (4), можна оцінити на основі статистичних характеристик порушеного гірського масиву.

Так, площа фільтрації  $S_w$  (далі індекси  $i, j, k$  для простоти опущені) визначається у такий спосіб. Виходячи з наближення до циліндричної форми виробок, можна записати для об’єму порожнин  $V_w$  у межах блока-паралелепіеда:

$$V_w = \pi \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 l_w(r) p_w(r) dr \approx \pi l_{w,a} \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 p_w(r) dr, \tag{5}$$

де  $l_w(r)$  – довжина виробітки радіуса  $r$ ,  $l_{w,a}$  – її середнє значення для виробок усіх розмірів;  $p_w(r)$  – щільність розподілу виробок за об’ємом,  $[r_{min}, r_{max}]$  – діапазон зміни радіусів виробіток.

При аналогічних допущеннях:

$$S_w = 2\pi \int_{r_{min}}^{r_{max}} r l_w(r) p_s(r) dr \approx 2\pi l_{w,a} \int_{r_{min}}^{r_{max}} r p_s(r) dr, \quad (6)$$

де  $p_s(r)$  – щільність розподілу виробок за площею їхньої бічної поверхні в залежності від радіуса. Зіставляючи (5) і (6), одержимо:

$$S_w = 2V_w \int_{r_{min}}^{r_{max}} r l_w(r) p_s(r) dr \Big/ \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 l_w(r) p_w(r) dr. \quad (7)$$

Параметри розподілів  $p_w(r)$  і  $p_s(r)$  можна оцінити за наявності інформації про розміри виробок у даному блоці або частині шахтного поля. При рівномірному розподілі ( $p_w(r) = p_s(r) = 1/(r_{max} - r_{min})$ ):

$$S_w = \frac{4}{3} \frac{r_{max}^2 - r_{min}^2}{r_{max}^3 - r_{min}^3} V_w. \quad (8)$$

Тоді при звичайному діапазоні радіусів виробок ( $r_{min} = 0,5$  м,  $r_{max} = 2,2$  м)  $S_w \approx 1,32 V_w$ . Зі збільшенням частки малих виробок числовий коефіцієнт перед  $V_w$  зростає, хоча звичайно не перевищує 2–2,5. Збільшення площі контакту «виробка–оточуючий масив» аналогічно збільшенню питомої поверхні скелету пористого середовища при зменшенні розмірів часток [10].

При осередненні напору уздовж вертикалі в прийнятій розрахунковій схемі перепад напору  $\Delta H_{w,ijk}$  розраховується як різниця між рівнем підземних вод і середнім положенням дренажних (або затоплюваних) виробіток на горизонті відпрацювання:

$$\Delta H_{w,ijk} = H_{ij} - \bar{H}_{w,k},$$

де  $\bar{H}_{w,k}$  – середнє висотне положення дренажних (або затоплюваних) виробок у  $k$ -му шарі. Величина  $\bar{H}_{w,k}$  залежить від положення рівня в шахтному стовбурі  $H_s$ , що визначає зону дренажування. При осушенні масиву  $\Delta H_{w,ijk} > 0$ , тому стік йде з тріщинуватого масиву до виробіток. При затопленні в нижній частині шахтного поля з'являються зони, де  $\Delta H_{w,ijk} < 0$ , при цьому вода із системи виробок надходить до тріщин. У рамках створеної моделі можна врахувати різні рівні дренажування в різних частинах шахтного поля, а також нерівномірність появи виробок у часі.

Параметр  $L_a$  у формулі (4) можна оцінити в такий спосіб. Припустимо, що порожнистість (частка об'єму виробок у загальному об'ємі) в горизонтальному чи вертикальному перерізі блоку дорівнює його об'ємній порожнистіості  $\eta_a = V_w/V_b$ , де  $V_b$  – об'єм блоку. Тоді сумарна площа перетину виробок через деяку грань площею  $S'$  складає  $S_{w,\Sigma} = \eta S'$ . Середня площа перетину окремої виробки гранню блоку:

$$S'_w = \pi \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{r p_s(r)}{\cos \alpha} dr, \quad (9)$$

де  $\alpha$  – кут між виробкою і гранню блоку. При рівномірному розподілі  $p_s(r)$  і тих же значеннях  $r_{max}$  і  $r_{min}$  величина  $S'_w$  складе близько  $9 \text{ м}^2$ . Припустимо далі, що відношення площі непроникної фази до площі виробок у перетині залишається однаковим у масштабі блоку і для більш дрібного блоку навколо окремої виробки:

$$\frac{S_1}{S'_w} = \frac{S'}{S_{w,\Sigma}}, \quad S_1 = \frac{S'_w}{\eta_a}, \quad (10)$$

де  $S_1$  – площа непроникної фази в перетині, що припадає на одне вироблення.

У межах перетину площею  $S_1$  йде фільтрація до границі «виробка–масив». Середня відстань від довільної точки такого перетину до границі можна визначити, замінивши його однією з простих фігур (коло, квадрат) тієї ж площі (рис. 3). У випадку кола виділимо зовнішню границю – окружність радіусом  $R_m = \sqrt{S'_w/\pi}$  і внутрішню – окружність радіусом  $r_w = \sqrt{S_{w,s}/\pi}$ . Середня відстань від довільної внутрішньої точки такої фігури до малої окружності складе:

$$r_a = \pi \int_{r_w}^{R_m} r r dr \Big/ \pi \int_{r_w}^{R_m} r dr = \frac{2}{3} \frac{R_m^3 - r_w^3}{R_m^2 - r_w^2}. \quad (11)$$

При типових значеннях порожнистіості й розмірів виробок значення  $r_a$  складає кілька метрів, зменшуючись у сильно порушених ділянках і зростаючи в частинах шахтного поля з малим об'ємом виробленого простору. З урахуванням звивистості порожнин слід прийняти  $L_a = \chi r_a$ , де  $\chi$  – коефіцієнт звивистості, прийнятий за аналогією з пористим середовищем [10].

Зміна рівня води в стовбурі в період осушення і видобутку визначається за графіком відпрацьовування вугільних шарів. Після відключення водовідливу на кожному часовому кроці величина  $H_s$  розраховується за формулою [5]:

$$H_s(t + \Delta t) = H_s(t) + Q_{w,\Sigma}(t)\Delta t / S_h(H_s(t)), \quad (12)$$

де  $Q_{w,\Sigma}(t)$  – сумарний приплив до виробок в момент часу  $t$ ,  $S_h(H_s)$  – площа їхньої горизонтальної поверхні на рівні  $H_s$ .

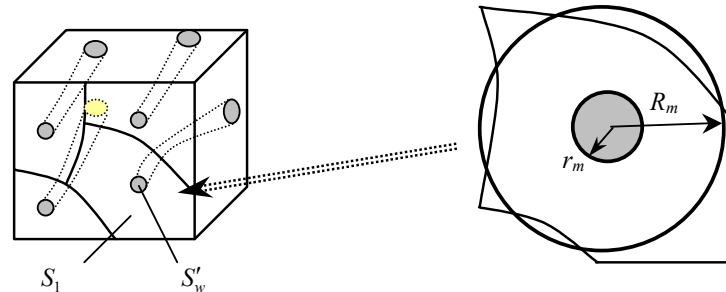


Рис. 3. Схема до розрахунку водопритока у виробки з масиву

**Апробація методики.** Розроблена методика застосована для розрахунку зміни рівня підземних вод на шахтному полі в період його розробки і після відключення водовідливу. Вихідні дані приймалися згідно з гірничо-гідрогеологічними умовами, типовим для Центрального району Донбасу. На границі шахтного поля розміром 5×6 км установився стаціонарний рівень підземних вод 200 м. Тріщинна порожнистість порід масиву складає 0,015. При затопленні, для врахування вмісту вологи в тріщинах, замість цієї величини в рівнянні (1) задавався менший параметр водовіддачі. Параметри, що характеризують розподіл коефіцієнта фільтрації й об’єму виробленого простору за глибиною, наведені на рис. 1 і 2. Розрахунки проводилися на прямокутній сітці з розміром блоків 50×50 м, з максимальним кроком у часі 10 діб. Результати моделювання представлені на рис. 4–6.

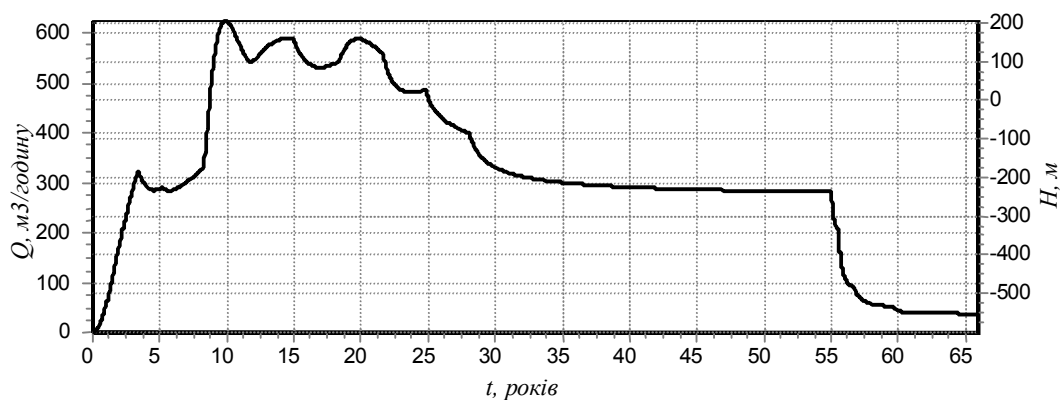


Рис. 4. Зміна водопритока (жирна крива), рівня води в шахтному стовбурі (тонка чорна крива) і рівня підземних вод поблизу шахтного стовбура (тонка сіра крива)

Аналіз зміни сумарного водопритока в шахту (рис. 4) показує, що найбільший приплив спостерігається при відпрацьовуванні верхніх шарів, які характеризуються більшою проникністю. Цим пояснюються, зокрема, локальні максимуми величини  $Q_w$  у перші 10–20 років після початку розробки. У цей період рівень підземних вод знаходиться переважно в межах двох верхніх горизонтів відпрацьовування з відносно високим коефіцієнтом фільтрації. В міру заглиблення виробок і дренавання нижніх горизонтів водоприток стабілізується.

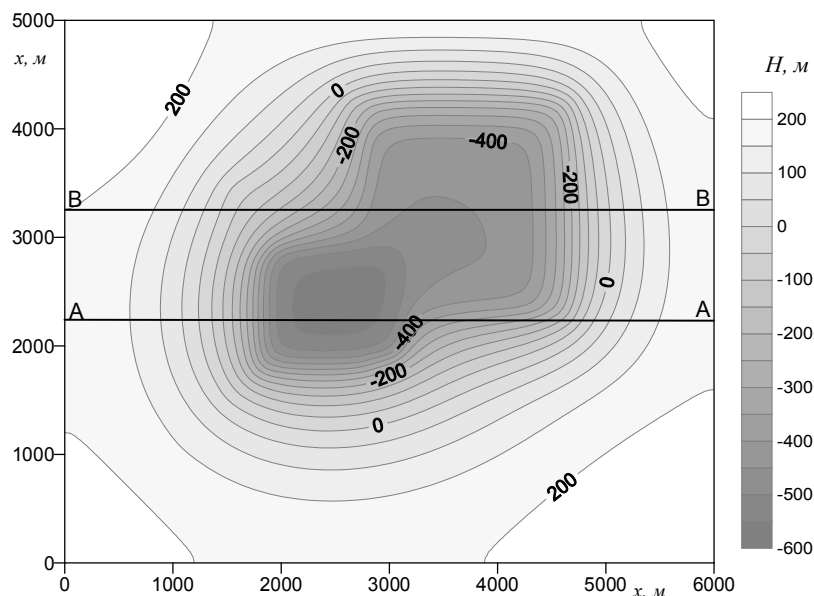


Рис. 5. Рівень підземних вод на шахтному полі перед відключенням водовідливу

Період незначного зменшення водопритока (28–55 років після початку відпрацювання) характеризується майже постійним рівнем води в шахтному стовбурі й розподілом підземних вод (рис. 5), що повторює контури зон відпрацювання. Найбільше зниження спостерігається у тих зонах, де відповідно до прийнятих вихідних даних обсяг виробленого простору більше. В міру підйому рівня підземних вод при затопленні зазначені нерівномірності згладжуються (рис. 6).

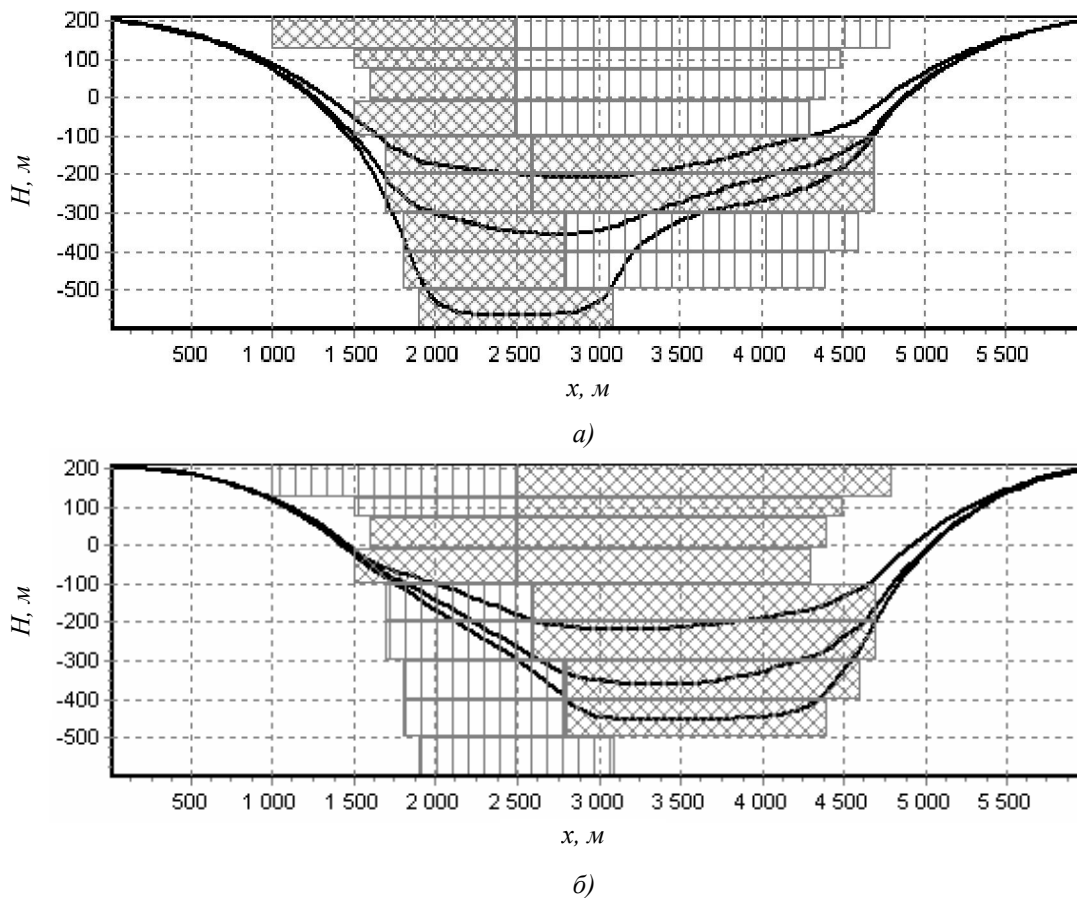


Рис. 6. Рівні підземних вод: а) уздовж профілю А–А, б) уздовж профілю В (рис. 5) на різні періоди після відключення водовідливу

Рівень підземних вод при затопленні відстає від рівня води в шахтному стовбурі. Це пов'язано з тим, що заповнення виробок водою відбувається в основному за рахунок бічного припливу. Повне насичення водою осушених тріщин відбувається не одночасно із затопленням вироблень на тій же висоті, а з запізненням, викликаним відновленням пружних запасів.

**Висновки.** Розроблена методика дозволяє прогнозувати динаміку осушення і затоплення шахтного поля з урахуванням специфіки гірничо-геологічних і гідрогеологічних умов. За допомогою прийнятого підходу виявляється можливим у рамках двовимірної моделі розраховувати водоприток на кожному горизонті. Застосований спосіб апроксимації по шарах–горизонтах відпрацьовування дозволяє створювати регіональні моделі, які б при збільшенні охоплення території зберігали адекватність відображення структури підроблених масивів у вуглевидобувних районах. Крім того, розроблена методика дає можливість більш обґрунтовано прогнозувати динаміку емісії метану і витиснення рудникових газів із шахтного поля в міру затоплення зон газовиділення.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах / В.А. Мироненко, Е.В. Мольский, В.Г. Румынин. – Л.: Недра, 1988. – 277 с.
2. *Spizzichino K., Walton W.C.* Numerical Groundwater Modeling. – CRC Press, 1989. – 272 p.
3. Flow and Transport in Fractured Porous Media / Ed. by Teutsch, G. Springer Verlag. – 2005. – 465 p.
4. *Рудаков Д.В.* Моделирование процессов осушения и затопления системы подземных горных выработок (на примере Кривбасса) // Сб. науч. трудов НГА Украины. – Днепропетровск. – № 3. – Т. 5. – 1998. – С. 83–87.
5. *Садовенко И.А., Рудаков Д.В., Загрищенко А.Н., Фоций Н.В.* Прогнозирование процесса затопления шахт в условиях перетекания между водоносными горизонтами // Матеріали українсько-польського Форуму гірників (Ялта, Крим, 9–13 вересня 2004 р.) – НГУ, Дніпропетровськ. – 2004. – С. 533–539.
6. Гидрогеология СССР. – Т. VI. – Донбасс. – М.: Недра, 1971. – 480 с.
7. *Лукнер Л., Шестаков В.М.* Моделирование миграции подземных вод. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
8. *Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хруц В.К., Беляев Н.Н.* Численное моделирование распространения загрязнений в окружающей среде. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
9. *Рудаков Д.В.* Оценка точности численного моделирования массопереноса в пористой среде вблизи внутреннего источника сложной формы // Вісник Дніпропетр. ун-ту / Механіка. – Вип. 3. – Т. 1. – 2000. – С. 137–142.
10. *Коллинз Р.* Течения жидкостей через пористые материалы. – М.: Мир, 1964. – 350 с.

РУДАКОВ Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного гірничого університету.

Наукові інтереси:

– моделювання фізичних процесів у навколишньому середовищі.

E-mail: [dmi3rud@mail.ru](mailto:dmi3rud@mail.ru)

САДОВЕНКО Іван Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного гірничого університету.

– гідрогеомеханіка техногенних та природних об'єктів;

– керування станом техногенного середовища.

Подано 28.12.2005

**Рудаков Д.В., Садовенко І.О.** Прогнозування гідродинамічного режиму при відпрацьовуванні і затопленні шахтного поля

**Рудаков Д.В., Садовенко И.А.** Прогнозирование гидродинамического режима при отработке и затоплении шахтного поля

**Rudakov D.V., Sadovenko I.O.** Forecasting of the hydrodynamic regime during working out and flooding a minefield

УДК 622.5.001.57

**Прогнозирование гидродинамического режима при отработке и затоплении шахтного поля / Д.В. Рудаков, И.А. Садовенко.**

Разработана методика расчета параметров гидродинамического режима шахтного поля, учитывающая различные периоды его эксплуатации. Структура разрабатываемого массива схематизируется с помощью слоев, соответствующих горизонтам отработки. Рассчитываемый водоприток зависит от динамики расширения и затопления выработанного пространства. В результате моделирования показана возможность применения методики в реальных горно-гидрогеологических условиях.

УДК 622.5.001.57

**Forecasting of the hydrodynamic regime during working out and flooding a minefield / D.V. Rudakov, I.O. Sadovenko.**

The principles to calculate the hydrodynamic regime parameters are developed for different stages of the minefield exploitation. The structure of a massif is simplified using the layers corresponding to working horizons. The calculated water inflow depends on underground space enlargement and flooding. The numerical modeling has demonstrated how the developed principles can be applied to real mining and hydrogeological conditions.

УДК 622.5.001.57

/

Розроблено методику розрахунку параметрів гідродинамічного режиму шахтного поля, що враховує різні періоди його експлуатації. Структура розроблювального масиву схематизується за допомогою шарів, що відповідають горизонтам відпрацьовування. Розрахований водоприток залежить від динаміки розширення і затоплення виробленого простору. В результаті моделювання показана можливість застосування методики в реальних гірничо-гідрогеологічних умовах.