

Основным преимуществом варианта *Ію* развития горных работ является то, что большая часть объемов вскрыши выполняется комплексом машин непрерывного действия НКМЗ при максимально возможной высоте уступа 35-40 м.

Основным недостатком варианта *Ію* является то, что при использовании данной схемы происходит значительное опережение фронта горных работ карьера «Юг» относительно карьера «Север» на 200 м, а отметки горизонтов, на которых будут находиться роторные комплексы НКМЗ и ТК-2 будут не совпадать. Кроме того, производительность комплекса НКМЗ - 7,0-7,5 млн. м³/год вряд ли будет возможной.

Эксплуатационные затраты на вскрышные работы варианта технологической схемы производства вскрышных работ *ІІІю* составляет 131,7 млн. грн/год. Однако данный вариант технологической схемы является наиболее реальным, т.к. в варианте принята реальная производительность роторного комплекса НКМЗ.

Список литературы

1. Собко Б.Е. Прогнозная оценка производительности вскрышных комплексов и ее влияние на себестоимость разработки горных пород /Б.Е.Собко, А.М. Маевский // Збірник наукових праць НГУ.- 2010.- № 35.-Т.2.- С. 193-198.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Дриженком А.Ю.
Надійшла до редакції 20.06.11*

УДК 622.271.33

© В.І. Тимошук, В.В. Тішков, О.О. Шустов, Н.А. Нікіфорова

МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ ОБВОДНЕНОГО РОДОВИЩА ВІДКРИТИМ СПОСОБОМ

Обоснована расчетная схема и фильтрационные параметры гидродинамической модели месторождения. Проанализирован гидродинамический режим подземных вод при отработке месторождения открытым способом. Приведена оценка геомеханической устойчивости угольной толщи на дне разрезной траншеи.

Обґрунтована розрахункова схема й фільтраційні параметри гідродинамічної моделі родовища. Проаналізований гідродинамічний режим підземних вод при відпрацюванні родовища відкритим способом. Наведена оцінка геомеханічної стійкості вугільної товщі на дні розрізної траншеї.

A calculation chart and lauter parameters of hydrodynamic model of deposit is grounded. The hydrodynamic mode of underwaters at working off the open-cast deposit is analysed. The estimation of geomechanical stability of coal layer on the bottom of cut trench is resulted.

Відомо, що нахилені родовища корисних копалин занурюються у надра до глибини 300 – 400 м і їх розробка відкритим способом супроводжується вийманням значних об'ємів порід розкриття, які суттєво обводнені. Окрема ж група буровугільних родовищ у соляних штоках характеризується напірними підземними

водами, що повсемірно обводнюють не тільки породи розкриву і пласти корисних копалин, а й розповсюджуються на значну глибину від проектних контурів кар'єрного поля. Тому до останнього часу розробка таких родовищ не ведеться. Це пояснюється тим, що поряд з великою потужністю пластів корисних копалин, наприклад, на Ново-Дмитровському родовищі сумарна потужність трьох пластів бурого вугілля досягає 115 м, прогнозний приплив підземних вод становить 60 – 70 тис. м³/год при гідравлічному тиску до 3 – 5 тис кПа. Зниження тиску підземних вод і осушення гірського масиву на робочих горизонтах за відомими технологіями здійснювати технічно складно й економічно невигідно.

Прогнозна оцінка гідродинамічного режиму підземних вод в умовах проекту відпрацювання Ново-Дмитрівського родовища виконана з використанням чисельного геофільтраційного моделювання, реалізованого на базі методу кінцевих різниць [1]. У реальних координатах геофільтраційна модель родовища представлена областю фільтрації розмірами 6,8 км у меридіональному напрямку і 2,6 м – у широтному. Розмір окремих розрахункових блоків моделі становить 200×200 м, загальна площа модельованої області – 10,92 км². У вертикальному перерізі чисельна модель відповідно до геологічної будови родовища й умов залягання водоносних горизонтів представлена п'ятишаровою товщею, окремі частини якої розділені різними по проникності водотривкими шарами. Першим розрахунковим шаром у геофільтраційній моделі моделюється товща піщано-глинистих водопроникних відкладень четвертинного віку, що залягає суцільним чохлом і перебиває вуглевмісні породи. Для цих відкладень характерно близьке до горизонтального залягання при порівняно витриманій потужності. Живлення приуроченого до них водоносного горизонту здійснюється як за рахунок атмосферних опадів, так і припливу із суміжних територій, розвантаження – у розгалужену балкову систему. Другим і третім шарами моделюються вугільні поклади відповідно до Верхньої й Складної лінз родовища. Характерним для цих відкладень є їхнє похиле залягання у межах крил лінз і практично горизонтальне – в їхній центральній частині.

Основна лінза у чисельній моделі представлена четвертим шаром, що має залягання, аналогічне другому й третьому водопроникним шарам у геофільтраційній моделі. Найбільш потужний і водовмісний горизонт, приурочений до підвугільної товщі пісків. У чисельній моделі він представлений п'ятим шаром, що також має мульдopodobне залягання. У силу відсутності виражених водотривких порід у покрівлі п'ятого шару, останній розглядається як єдина водопроникна товща разом із вугільним покладом четвертого горизонту.

Гіпсометричні поверхні покрівлі й підшви розрахункових шарів у чисельній моделі задані за даними розвідувального буріння у вигляді рівневих поверхонь, що дозволило деталізувати просторовий розподіл потужності водопроникних і поділяючих шарів та їх водопроникність. Гідродинамічно розглянута область на земній поверхні представлена водороздільною частиною із границями, відповідними до контурів мульдopodobної воронки, на яких здійснюється живлення водою з боку суміжних територій на ділянках виходу вуглевмісних порід під четвертинні відкладення. Гідродинамічна схематизація виконана з урахуванням особливостей живлення й розвантаження водоносних горизонтів

і враховує характер гідродинамічних режимів у верхньому й нижньому водоносних комплексах (рис. 1).

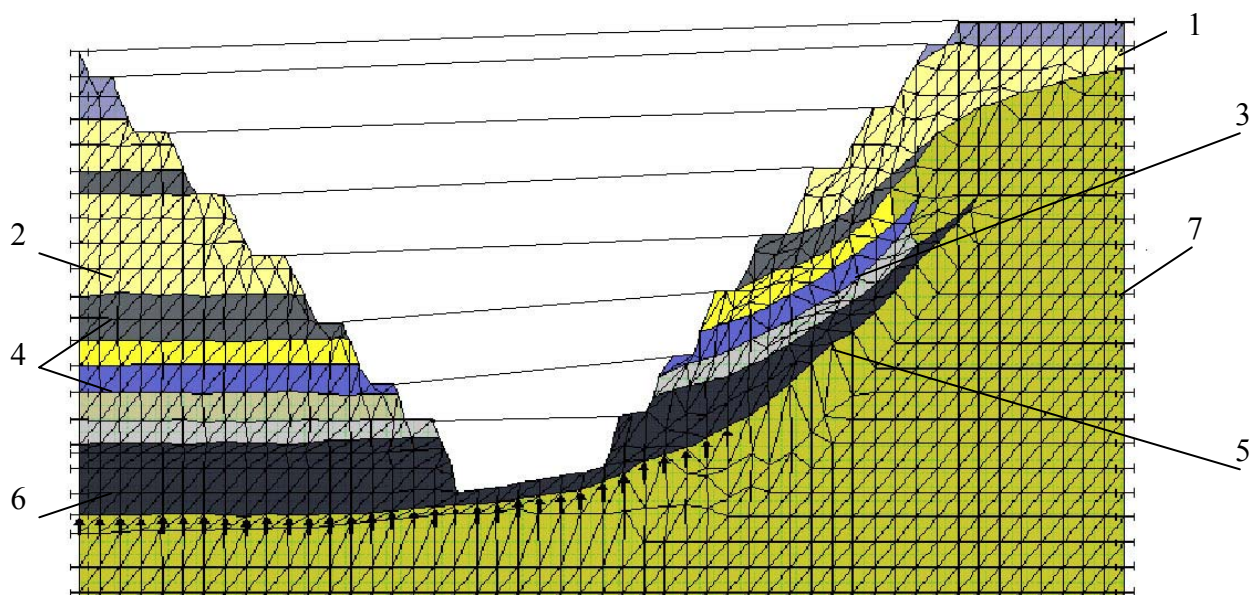


Рис. 1. Схема до моделювання гідрогеологічних умов Ново-Дмитрівського родовища: 1 – четвертинні суглинки, супісі; 2, 3 – відповідно глини, суглинки вуглисті; 4 – вугілля буре; 5 – діатоміти; 6 – вугілля буре (основна лінза); 7 – підвугільні піски

На контурах живлення й розвантаження моделюємих горизонтів задані умови вилучених границь із забезпеченим водопливом (умова першого роду $H=Const$) і абсолютними відмітками, відповідними до позначок поверхневих водотоків за межами моделюємої області. З урахуванням виконаної гідродинамічної схематизації значення позначок на північно-західному і південно-східному контурах моделюємої області встановлені відповідно рівними 125,00 м і 80,00 м. Вплив віддалених границь у моделі враховувалося введенням параметра взаємозв'язки підземних і поверхневих вод

$$DL = \frac{TS \cdot N}{L + \Delta L}$$

де TS – водопроникність водовмісної товщі, $\text{м}^2/\text{добу}$; N – довжина контуру водоймища в розрахунковому блоці, м; L – відстань від центру блоку до контуру водоймища, м; ΔL – похибка на гідродинамічну недосконалість, м.

Установлена за даними дослідних робіт і режимних спостережень величина гідродинамічної недосконалість тимчасових і малих водотоків становить у середньому $\Delta L = 250$ м. Враховуючи віддаленість границь $H=Const$ при значеннях водопровідності водоносних горизонтів $TS = 5 - 200$ $\text{м}^2/\text{добу}$ величина параметра взаємозв'язки на контурах моделюємої області становить $DL = 0,16 - 6,67$ $\text{м}^2/\text{добу}$ при відстані до контурів живлення $\Delta L = 5000 - 6000$ м. Інфільтраційне живлення у межах моделюємої області оцінене з урахуванням особливостей досліджуваної території і склало величину порядку 50 мм/рік. Причому, його доля, що надходить із суміжних територій у вигляді додаткового контурного живлення, оцінювалася величиною порядку 750 мм/рік. Надалі граничні умови на

границях області фільтрації коректувалися виходячи із загального балансу геофільтраційної моделі при вирішенні зворотних завдань.

Для характеристики просторової мінливості водопровідності водовмісних порід її значення в чисельній моделі розраховувалися в кожному блоці моделюємої області залежно від потужності водоносних горизонтів і корегувалися у процесі вирішення зворотних завдань. При встановленні фільтраційних параметрів за основу прийняті дані інтерпретації дослідно-фільтраційних робіт, виконаних на різних етапах розвідки родовища. Відповідно до результатів цих досліджень значення коефіцієнта фільтрації для різних типів водовмісних порід установлене єдиним і рівним 1,0 м/добу. Відповідно до наведеного значення діапазон зміни водопровідності по розрахункових пластах у межах моделюємої області склав від 1,0 до 634,0 м²/добу. Коефіцієнт фільтрації розподіляючих шарів у межах моделюємої товщі становив 0,09 м/добу. Ємнісні характеристики водопроникних порід визначалися рівнем коефіцієнта водовіддачі, значення якого для розрахункових шарів відповідно до гідрогеологічних умов і типом відкладань прийняте $\mu=0,1$. Характер рівневих і п'єзометричних поверхонь водоносних горизонтів установлений за даними розвідницького буріння й урахував загальні закономірності формування гідродинамічного режиму в межах досліджуваної території.

Для обліку розвантаження водоносного горизонту в поверхневій водотоки у межах тальвегів балок Боброва і Кругла в чисельну модель введений коефіцієнт інтенсивності височування, яким забезпечувалася можливість підтримки рівня ґрунтових вод у межах знижених ділянок рельєфу на оцінках, що не перевищують гіпсометричних відміток денної поверхні. Його значення встановлене, виходячи із середнього коефіцієнта фільтрації порід, у межах зони аерації та її потужності й склало 0,1 доб⁻¹.

Збіжність чисельних розрахунків оцінювалася у процесі вирішення зворотних задач за результатами аналізу балансових складових геофільтраційної моделі, а також відповідності початковим положенням рівневої поверхні у четвертинному водоносному горизонті та п'єзометричних поверхонь підземних вод у вугільних шарах і водовмісних супутніх породах. Рішення зворотних задач являло собою сукупність розрахунків, у процесі яких визначався вплив на рівневі поверхні підземних вод послідовних змін інфільтраційного живлення, водопровідності й параметрів взаємозв'язку підземних і поверхневих вод на контурах моделюємої області.

Прийнята гідродинамічна модель Ново-Дмитрівського буровугільного родовища на етапі епігнозного моделювання дозволила виконати оцінку балансових складових моделюємої області відповідно її геолого-структурних і гідрогеологічних особливостей. Представлені рівневі поверхні по розрахункових шарах моделюємої області відтворюють існуючий характер живлення й розвантаження підземних вод у межах природних контурів досліджуваної території.

Розвантаження водоносних горизонтів відбувається до поверхневих водотоків тальвегів балок, причому, для четвертинного водоносного горизонту істотним є наявність зон височування у знижених формах рельєфу. До особливостей гідравлічного взаємозв'язку водоносних горизонтів четвертинного водонос-

ного горизонту, водоносних горизонтів вуглевмісної товщі й товщі підвугільних пісків слід віднести наявність у межах крил мульдopodobної структури великих зон заміщення слабкопроникних глинистих відкладань водопроникними піщаними породами. Характер живлення і розвантаження водоносних горизонтів моделюємої області ілюструється її загальним балансом і балансом по розрахункових шарах, складові якого наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Балансові складові моделюємої області родовища, м³/добу

| Складові балансу | Живлення | Розвантаження |
|----------------------------------|-----------------|---------------|
| Моделюєма область | | |
| Взаємозв'язок з ріками | 575,70 | -3297,92 |
| Інфільтрація | 2646,58 | 0,00 |
| Погрішність / Неув'язка (%) | -75,64/ -0,279 | |
| Четвертинний водоносний горизонт | | |
| Взаємозв'язок з ріками | 20,24 | -338,53 |
| Інфільтрація | 2646,57 | 0,00 |
| Перетікання через підшову | 0,00 | -2329,23 |
| Погрішність / Неув'язка (%) | -0,94/ -0,017 | |
| Верхня вугільна лінза | | |
| Взаємозв'язок з ріками | 49,38 | -185,07 |
| Перетікання через покрівлю | 2329,23 | 0,00 |
| Перетікання через підшову | 0,00 | -2195,74 |
| Погрішність / Неув'язка (%) | -2,201 / -0,046 | |
| Складна вугільна лінза | | |
| Взаємозв'язок з ріками | 165,84 | -914,14 |
| Перетікання через покрівлю | 2195,74 | 0,00 |
| Перетікання через підшову | 506,97 | -1986,34 |
| Погрішність / Неув'язка (%) | -31,94/ -0,553 | |
| Основна вугільна лінза | | |
| Взаємозв'язок з ріками | 166,43 | -915,31 |
| Перетікання через покрівлю | 1986,34 | -506,97 |
| Перетікання через підшову | 1256,13 | -1992,42 |
| Погрішність / Неув'язка (%) | -5,80/ -0,084 | |
| Товща підвугільних пісків | | |
| Взаємозв'язок з ріками | 173,81 | -944,87 |
| Перетікання через покрівлю | 1992,42 | -1256,13 |
| Погрішність / Неув'язка (%) | -34,76 / -0,796 | |

Аналіз результатів моделювання показав, що основним джерелом живлення водоносних горизонтів у межах моделюємої області є інфільтрація атмосферних опадів і перетікання води з вищележачих горизонтів у нижчележачі через поділяючі їх слабкопроникні шари та ділянки їх виклиновування на кри-

лах мульди; частково – за рахунок підтоку підземних вод із суміжних ділянок на контурах водорозподілів.

Оцінка гідродинамічного режиму підземних вод у моделюємій області при розкритті й відпрацьовуванні родовища відкритим способом виконана за результатами чисельного моделювання в умовах нестационарного режиму фільтрації [2]. Вирішення прогностичних задач геофільтрації являло собою сукупність послідовних рішень, відповідних до розрахункових періодів розвитку гірничих робіт по площі й глибині. Отримані рішення відповідають тимчасовим періодам відпрацьовування родовища протягом 1, 6, 8, 11, 14, 17 і 20 років. Розрахункові періоди встановлені за умови досягнення дном кар'єру позначок покрівлі шарів, що перекривають водовмісні породи четвертинного водоносного горизонту, верхньої, складної та основної вугільних лінз.

Встановлено, що формування депресійної воронки в четвертинному водоносному горизонті відповідає положенню контурів кар'єру в межах проектних контурів. При цьому в горизонтах, що залягають нижче, практично відсутні помітні зміни в рівневному режимі підземних вод. Це пояснюється, з одного боку, наявністю розподіляючих шарів у межах мульдopodobної структури, а з іншого – значними ємнісними запасами вуглевмісної товщі. Величини водопритоков на цей період становлять $2420 \text{ м}^3/\text{доб}$.

На 6-ти літній період розвитку гірничих робіт відповідний до положення дна кар'єру стан покрівлі складної лінзи (абсолютна позначка $-30,00 \text{ м}$) відзначається істотним зростанням дренального впливу контурів розрізної траншеї. Так, практично у всіх розрахункових шарах починається формування гідродинамічних ліній депресій в межах контурів кар'єру. Найбільшому впливу піддаються верхні водоносні горизонти, у меншій мірі – водоносний горизонт підвугільних пісків, що пов'язано з його значними ємнісними запасами. До особливостей цього періоду розкриття родовища слід віднести початок формування зон осушення в межах контурів розрізної траншеї, яке відзначається в четвертинному водоносному горизонті й горизонті верхньої вугільної лінзи. Величини водопритоків у кар'єр на 6 рік ведення гірничих робіт оцінюються об'ємом $19407 \text{ м}^3/\text{добу}$. Їхнє формування відбувається як за рахунок ємнісних запасів, так і задіяних ресурсів з верхніх горизонтів.

Поглиблення кар'єру до позначок покрівлі основної лінзи (8-річний розрахунковий період, позначка дна кар'єру -110 м) супроводжується збільшенням розмірів депресійних воронок у всіх водоносних горизонтах, включаючи і товщу підвугільних пісків. Зниження рівнів води в границях кар'єру й відробка ємнісних запасів приводить до збільшення площі ділянок осушення верхніх горизонтів вуглевмісної товщі. При цьому величина водопритоків у кар'єр на цей період зростає до $52386 \text{ м}^3/\text{добу}$.

Поступальне переміщення розрізної траншеї і її поглиблення до позначки -160 м у міру відпрацьовування покладів (11-літній розрахунковий період) приводить до осушення більш великих ділянок верхніх водоносних горизонтів і зросту кар'єрного водопритоку до $72534 \text{ м}^3/\text{добу}$. Збільшення площі осушення водоносних горизонтів свідчить про переважну роль ємнісних запасів підземних вод у формуванні кар'єрних водопритоків.

Подальше ведення гірничих робіт при поступальному переміщенні розрізної траншеї й відпрацювання порід усередині кар'єрного простору приводить до поступового осушення крайових ділянок буровугільних покладів. Так, при зниженні позначки гірничих робіт від -160 до -200 м на розрахункові періоди експлуатації кар'єру станом на 14 і 17 роки разом з верхніми водоносними горизонтами відзначається поступове осушення також і основної лінзи. При цьому обсяги кар'єрних водопритоків зберігаються на рівні $66 - 76$ тис. $\text{м}^3/\text{добу}$ з тенденцією до поступового зниження.

Результати прогнозних розрахунків на 20-ти літній період відпрацьовування родовища показали, що при положенні дна розрізної траншеї на позначках товщі основної лінзи та віддаленні її від контуру розкриття на відстань 1200 м у напрямку проектного відпрацьовування вугільного шару формуються ще більші зони осушення. При цьому підвугільна товща пісків залишається водовмісною і в ній зберігаються високі значення напорів. Розрахункові величини водопритоків на цей період перебувають у межах $60 - 65$ тис. $\text{м}^3/\text{добу}$.

Для оцінки ефективності глибинного дренажу моделювалася робота дренажних виробок, проведених у товщі Основного вугільного покладу на відстань до 400 м від розрізної траншеї. Встановлено, що при значному віддаленні дренажного контуру від розрізної траншеї відбувається формування незалежної гідродинамічної депресії, що суттєво знижує ефективність випереджувального глибинного дренажу (рис. 2). Розвиток значних градієнтів напорів у межах моделюємої області зумовлене, з одного боку, наявністю слабопроникних поділяючих відкладань, з іншого боку – ємнісними запасами підземних вод, приурочених до потужної товщі підвугільних пісків.

Слід зазначити, що переважна роль інфільтраційного живлення і ємнісної складової у формуванні кар'єрних водопритоків робить малоефективним вертикальний дренаж на границях вуглевмісної товщі. У цих умовах найбільш доцільним з погляду керування гідродинамічним режимом є ведення гірничих робіт з послідовним переміщенням положення розрізної траншеї та складуванням порід розкриття у виробленому просторі при реалізації динамічного контурного дренажу, що забезпечує зниження напорів у межах ділянок, які безпосередньо прилягають до контурів розрізної траншеї. Збереження розмірів розрізної траншеї у цьому випадку буде забезпечувати сталість дренажного контуру кар'єру й, відповідно, зниження об'ємів, що формуються кар'єрними водопритоками у міру відробки статичних запасів підземних вод у товщі підвугільних пісків.

Для оцінки гідромеханічної стійкості вугільної товщі на дні розрізної траншеї в межах основної лінзи виконано дослідження напружено-деформованого стану вуглевмісних порід з використанням засобів чисельного геомеханічного моделювання. При цьому чисельна модель являла собою кінцево-елементну апроксимацію вивчаємої області мережею трикутних елементів із заданими фізико-механічними характеристиками відповідно до геолого-структурної будови Ново-Дмитрівського родовища.

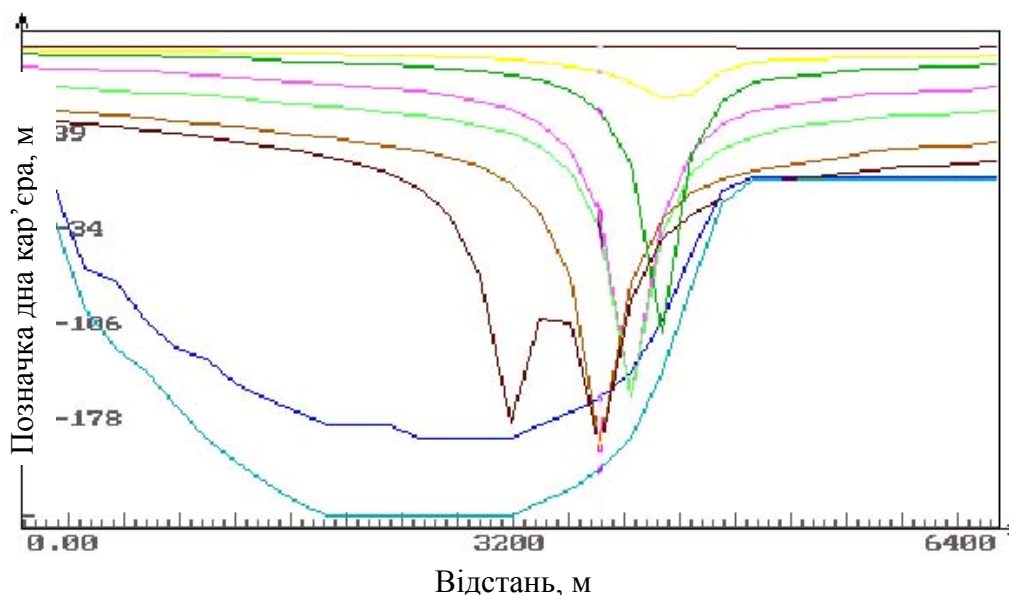


Рис. 2. Рівневі поверхні водоносних горизонтів вуглевмісної товщі кар'єру за різні періоди ведення гірничих робіт при експлуатації дренажних споруджень, м

Розміри моделюємої області визначені з умови мінімізації впливу зовнішніх контурів моделі на напружено-деформований стан досліджуємого масиву охоплюють геологічний розріз довжиною 2600 м і глибиною 540 м. Площа окремих елементів становить 1250 – 2500 м² при загальній площі моделюємої області близько 1,4 млн. м².

Силовa взаємодія між елементами в чисельній моделі забезпечувалася дією гравітаційних сил, зумовлених масою породної товщі. Значення розрахункових параметрів фізико-механічних властивостей для геолого-літологічних різновидів порід змінювалися в діапазоні: модуль деформації $E = 3000 - 35000$ кПа; питома вага $\gamma = 15,35 - 20,01$ кН/м³; питома зчеплення $C = 0,1 - 126,0$ кПа, кут внутрішнього тертя $\varphi = 11,0 - 33,0$ град.

Методикою моделювання передбачався розгляд сукупності чисельних рішень, які виконувалися відповідно до можливої зміни напружено-деформованого стану породного масиву й виникнення у межах вугільного цілика на підставі розрізної траншеї зон позамежного деформування при різних величинах залишкового напору в підвугільних пісках. Останній у чисельній моделі імітувався набором зосереджених сил у ґрунті вугільної цілини.

При цьому чисельні рішення представляли постановку й проведення обчислювального експерименту, який полягав у прогнозній оцінці напружено-деформованого стану породного масиву в умовах зміни значень контурних навантажень у підшві вугільного цілика. До розгляду були прийняті варіанти рішень при довжині розрізної траншеї 500 м і потужності вугільного цілика 5, 10, 20, 40 і 60 м.

Критерієм нестабілізованого розвитку процесу руйнування вугільного цілика у чисельній моделі був необмежений ріст деформацій за умови «виходу» елементів моделі до області пластичного плину. У чисельнім рішенні це виражалось відсутністю збіжності ітераційного процесу, який контролюється наборо-

ром теоретичних напруг по граничному стану. Отримані по варіантам чисельних рішень результати являли собою поля станів елементів моделі, які відображали характер їх деформування при різній комбінації потужності вугільного цілика й величини залишкового напору в його підшві. Наведені на рис. 1.5 поля елементів відповідають граничному стану вугільної цілини при заданій величині залишкового напору: 1 – пружне деформування; 2 – пластичний плин; 3 – розривні деформації.

За результатами моделювання встановлено, що при досягненні дном кар'єру підшви контуру основної вугільної лінзи 500 м, стійкий стан вугільного масиву забезпечується за умови, коли потужність цілика буде не менше половини величини залишкового напору підземних вод. Характер зв'язку потужності вугільного цілика й залишкового напору за умови збереження геомеханічної стійкості цілини, установлений за результатами моделювання, показаний на рис. 3.

Дослідження гідрогеологічних умов родовища призводять до висновку, що для створення безпечних умов розкриття та розробки родовища потрібно проведення комплексу дренажних заходів основною метою яких являється осушення харківського водоносного горизонту на крилах мульди, зниження його напору до підшви основної вугільної лінзи, а також обмеження надходження води до видобувних вибоїв з порід розкривної товщі.

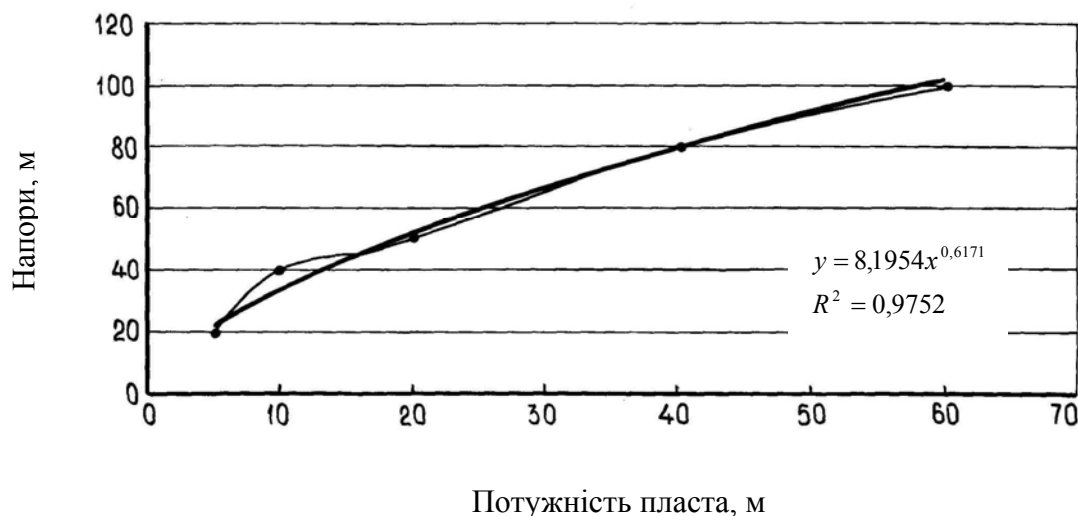


Рис. 3. Графік співвідношення залишкових напорів і потужності вугільного цілика у підшві розрізної траншеї, що забезпечують його геомеханічну стійкість

Для підвищення ефективності дренажного водозниження у наведених умовах доцільним представляється реалізація динамічного контурного дренажу, що забезпечує зниження напорів у межах ділянок, що безпосередньо прилягають до границь розрізної траншеї.

Список літератури

1. Фадєєв А.Б. Метод кінцевих елементів у геомеханіці. – М.: Надра, 1987.
2. Ломакін Є.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Чисельне моделювання фільтрації підземних вод. – М.: Надра, 1988.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Дриженком А.Ю.
Надійшла до редакції 19.05.11*