

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАТОПЛЕНИЯ ШАХТЫ № 2 «НОВОГРОДОВСКАЯ» С УЧЕТОМ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕЕ ТЕПЛОВОГО РЕСУРСА

Садовенко И. А., Инкин А. В., Рудаков Д. В., Хрипливец Ю. В.

На основе анализа горнотехнических условий разработки и геолого-гидрогеологических особенностей затопленной шахты № 2 «Новгородовская» в программном комплексе «MODLOW v. 4.5» создана численная модель, отражающая процессы геофильтрации на ее территории. По результатам решения обратной задачи доказана корректность разработанной модели, а также оценен емкостной ресурс шахты, заключенный в шахтных водах и остаточных запасах угля. Моделирование динамики подъема уровня воды в системе затапливаемых горных выработок позволило установить распределение уровня подземных вод в пределах шахтного поля до и после прекращения водоотлива.

*Ключевые слова:* шахта; затопление; подземные воды; остаточные запасы угля; тепловой ресурс.

Шахта № 2 «Новгородовская», расположенная в южной части Красноармейского углепромышленного района Донбасса (рис. 1), была сдана в эксплуатацию в 1951 году и за период работы отрабатывала пласты  $k_8$  и  $l_1$ . Площадь шахтного поля составила 18 км<sup>2</sup> при абсолютной отметке максимальной глубины введения очистных работ –370,3 м и устьев стволов + 205 м. Верхняя граница отработки угольных пластов имеет отметку + 120 м, выше которой до отметки местного базиса разгрузки подземных вод в долине р. Соленой (+ 155 м) горные породы в основном заполнены водой [1]. С юга к шахте № 2 «Новгородовская» примыкает закрытая шахта им. Коротченко, а с севера и востока – действующие шахты № 1-3 «Новгородовская» и «Россия».

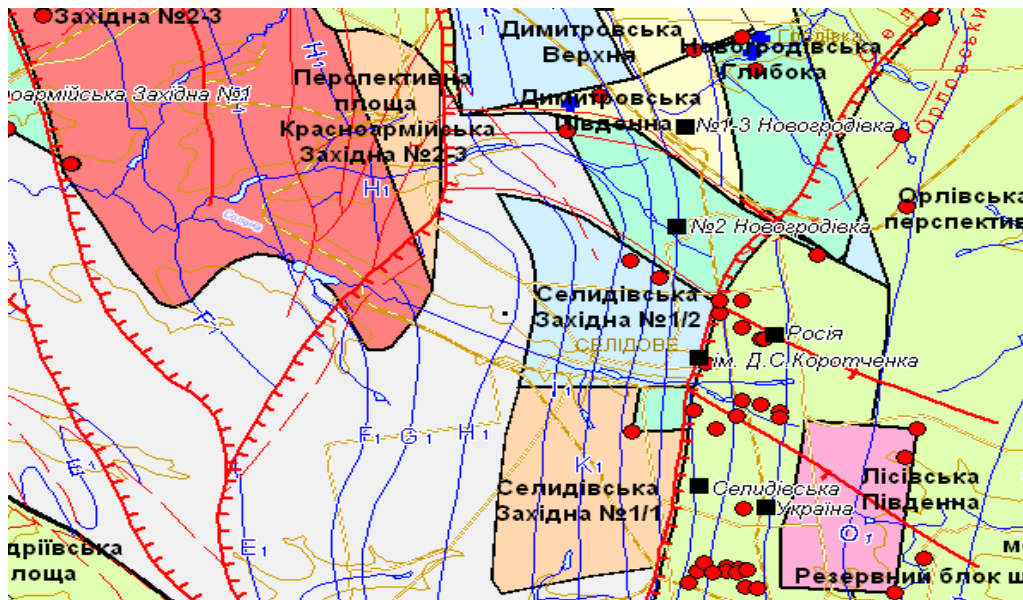
Приказом Министерства угольной промышленности Украины № 237 от 24.05.2001 г. шахта № 2 «Новгородовская» была закрыта с поддержанием уровня затопления водоотливным режимом. В непосредственной близости от шахты расположен город Новгородовка (с населением 15 тыс. человек), который после закрытия шахты стал ощущать острую нехватку тепловой энергии, благодаря чему промышленные и гражданские здания в холодное время года остались без отопления и горячего водоснабжения. Мировой научно-практический опыт (Германия, Франция, Англия) показывает

возможность рентабельного использования низкопотенциального тепла воды затопленных шахт для обогрева одно-двухэтажных зданий [2]. При этом подогрев шахтных вод до состояния приемлемого для теплоснабжения сооружений (60–70 °С) осуществляется с помощью тепловых насосов, требующих больших капитальных затрат на установку и обслуживание. Вместе с тем повышение температуры воды до необходимых показателей может быть достигнуто непосредственно на ликвидированной шахте путем ввода в эксплуатацию теплоэнергетического модуля, основанного на подземном сжигании оставшихся запасов угля для повышения температурного режима теплоносителей. Работа такого модуля сопряжена с периодическим отбором и закачкой воды из затопленных горных выработок и требует прогноза изменения гидродинамического режима на территории шахтного поля. Целью данной работы является анализ горно-геологических условий и создание гидрогеологической модели затопленной шахты № 2 «Новгородовская» для оценки и обоснования возможности разработки ее теплового ресурса с помощью теплоэнергетического модуля.

*Материал и результаты исследований.* В геолого-структурном отношении поле шахты № 2 «Новгородовская» расположено в пределах юго-западного крыла Кальмиус-Торецкой котловины и

приурочено к лежащему крылу крупного регионального тектонического нарушения – Селидовского надвига. В строении участка присутствуют отложения свит среднего карбона  $C_2^6$  и  $C_2^5$ , перекрытые

палеоген-неогеновыми песками и четвертичными суглинками (рис. 2). Свита  $C_2^5$  в нижней части содержит большое количество песчаников и незначительное количество углей [3]. В средней части



**Участки и площади:**



Рис. 1. Геолого-промышленная карта района расположения шахты № 2 «Новгородовская» (масштаб 1: 300000)

сосредоточены угольные пласты и прослои изменчивой мощности. Из пластов свиты, пригодных для промышленного освоения шахтой № 2 «Новгородовская», до отметки –370,3 м отрабатывался угольный пласт  $\kappa_8$ , при средних водопритоках в горные выработки 100–120 м<sup>3</sup>/час и частых прорывах воды из вышележащих песчаников и известняков. Такой характер поступления подземных вод обусловлен наличием в кровле пласта  $\kappa_8$  мощных водоносных горизонтов приуроченных к закарстованному известняку  $L_1$  и песчаникам  $L_1s$ ,  $l_1$  и  $l_1s$ . Со стороны почвы, в обводнении пласта участвовали песчаники

$\kappa_7^5$  и  $\kappa_8^H$ , удаленные от пласта на 5–10 м. Пласт  $\kappa_8$  (Аршинный) устойчивый, имеет простое строение и среднюю мощность 0,6–0,7 м. Угли пласта в основном гумусово-сапропелевые, являются клареновыми или близкими к ним. По характеру остудневания гелифицированных компонентов они относятся к третьему генетическому типу, отличающемуся высокой сернистостью. Балансовые запасы углей пласта  $\kappa_8$  на территории шахты № 2 «Новгородовская» в 1995 г. были оценены в количестве 988 тыс. т, а промышленные – 841 тыс. т. Таким образом, в результате потерь, вызванных горнотехническими

условиями разработки месторождения, в недрах оставлено более 140 тыс. т угля. Кроме того, по данным ОАО «Донбассгеология» в пределах шахтного поля в свите  $C_2^5$  содержится около 120 тыс. т забалансовых запасов углей, сосредоточенных в некондиционных и маломощных пластах  $k_7^5$  и  $k_8^H$ .

Свита  $C_2^6$  в границах поля шахты № 2 «Новгородовская» является наиболее угленасыщенной и содержит семь угольных пластов и пропластков, из которых промышленной разработке подвергался только пласт  $l_1$  «Шестичетвертовый» (рис. 2). Необходимо отметить, что водонасыщенный песчаник  $l_1 sl_3$ , залегающий непосредственно в пласте  $l_1$ , обуславливает значительный водоприток (200–250 м<sup>3</sup>/час) в горные выработки. Балансовые запасы угля оцениваются в 17355 тыс. т, а промышленные – в 12644 тыс. т, что соответствует потерям в размере 4711 тыс. т. Забалансовые запасы свиты  $C_2^6$ , в основном сосредоточенные в пластах  $l_4$  и  $l_5$ , оцениваются в 3215 тыс. т. Учет потерь и забалансовых запасов позволяет сделать вывод, что на сегодняшний день в пределах затопленной шахты № 2 «Новгородовская» сосредоточено более 8 млн т углей, свойства и состав которых приведены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает, что влажность углей района шахты по пластовым пробам изменяется в широких пределах – от 1,1 до 10,2 %, составляя в среднем 3–5 %. Выход летучих соединений также весьма разнообразен, при среднем значении 39 % этот показатель варьирует от 33 до 46 %. Удельная теплота сгорания углей изменяется незначительно, и в среднем равняется 32 МДж/кг. Содержание серы колеблется от 2,5 до 3,5 % (3 группа по сернистости). Необходимо отметить, что по своим физико-химическим характеристикам все угли свит  $C_2^6$  и  $C_2^5$  пригодны для разработки способом подземного сжигания [4].

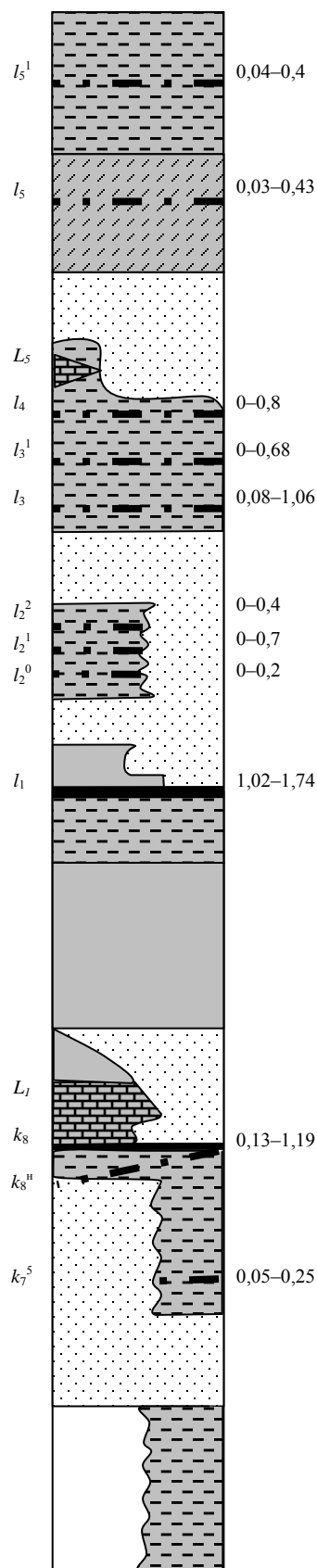


Рис. 2. Стратиграфическая колонка поля шахты № 2 «Новгородовская»

Рассматриваемая территория имеет сложное тектоническое строение, что обусловлено наличием мощных зон тектонического дробления пород, связанных

с Селидовским надвигом и его многочисленными апофизами. Надвиг характеризуется вертикальной амплитудой смещения 260–460 м и углом падения плоскости

Таблица 1

Свойства и марочный состав углей на территории поля шахты № 2 «Новгородовская»

| Индекс пласта               | W <sup>a</sup> , % | V, %  | Q <sub>6</sub> <sup>r</sup> , МДж/кг | Генетический тип | Марка угля |
|-----------------------------|--------------------|-------|--------------------------------------|------------------|------------|
| κ <sub>8</sub>              | 1,3–3,2            | 34–40 | 32,81–35,01                          | в                | Г          |
| l <sub>1</sub>              | 5–10,2             | 40–44 | 31,12–32,51                          | б                | Д          |
| κ <sub>7</sub> <sup>5</sup> | 1,5–2,5            | 38–46 | 33,10–33,53                          | в                | Г          |
| l <sub>4</sub>              | 1,1–2,4            | 33–39 | 33,70–33,86                          | б                | Г          |

сместителя 23–30°. Зона надвига отличается высокой анизотропией по проницаемости, а его зона дробления мощностью 9,6–81,9 м представлена перемятыми песчаными и глинистыми сланцами, образовавшимися в условиях сжимающих напряжений в направлении, перпендикулярном плоскости сместителя, может рассматриваться как слабопроницаемый раздельный слой. В лежачем крыле надвига в пределах шахты № 2 «Новгородовская» получили развитие Новгородовский сброс, являющийся северной границей шахтного поля, и Гродовский южный

сброс, вскрываемый выработками пласта l<sub>1</sub> и южным коренным штреком по пласту κ<sub>8</sub>. При приближении горных работ к отмеченным тектоническим нарушениям водоприток в очистные выработки в среднем увеличивался на 10–15 м<sup>3</sup>/час. При этом дебиты прорывов подземных вод, обусловленных влиянием сбросов, достигали 50–100 м<sup>3</sup>/час и носили кратковременный характер.

На рис. 3 во временном разрезе приведены выполненные и планируемые стадии использования ресурсов шахты № 2 «Новгородовская».

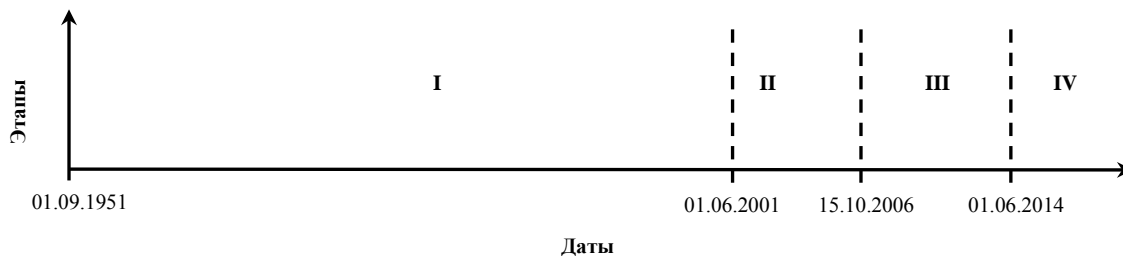


Рис. 3. Реализованные и планируемые этапы работы шахты

Первый этап соответствует периоду работы шахты и добычи угля, а второй – ее закрытию с действующим водоотливом и поддержанием уровня подземных вод на отметке –157 м в северном крыле шахты. Следующий этап отвечает завершению водоотливного режима и затоплению горных выработок до отметки +113,3 м (по состоянию на 15.04.2012 г.). На протяжении этого периода АО «Днепрогипрошахт» проводились наблюдения за темпом затопления шахты, которые позволили получить данные для решения обратной геофильтрационной задачи в

пределах шахтного поля. Ввод в эксплуатацию гидрогеотермального модуля с целью разработки остаточных тепловых ресурсов затопленной шахты для теплоснабжения г. Новгородовка предполагается на четвертом этапе.

В орографическом отношении поле шахты № 2 «Новгородовская» представляет собой слабоволнистое водораздельное плато, абсолютные отметки которого плавно уменьшаются от +213 м на юго-востоке до +190 м – на северо-западе. Его границами являются: на севере – Новгородовский сброс, на западе – выходы

пласта  $\kappa_8$  под палеоген-неогеновые отложения, на востоке – изогипса пласта  $\kappa_8$  –350 м. В пределах шахтного поля промышленными являются два угольных пласта, залегающие под гидравлически связанными водоносными горизонтами на расстоянии 25–30 м друг от друга, представленными известняком  $L_1$  мощностью до 5 м и песчаниками  $L_1sl_1$  и  $l_1sl_3$  со средней мощностью 15 и 20 м соответственно. Верхнее расположение пласта  $l_1$ , отрабатываемого до пласта  $\kappa_8$ , обусловило первоначальное поступление водопритоков в вышерасположенные горные выработки. Такой характер залегания угольных пластов формировал водопритоки в каждую из рассматриваемых угольных пачек, что и определяет следующий подход к геофильтрационной схематизации шахтного поля.

Модель отображает два промышленных пласта, разделяющий слой между ними, а также кровлю пласта  $l_1$  и подошву пласта  $\kappa_8$ . В результате модель шахты № 2 «Новгородовская» площадью 20 км<sup>2</sup> (4000 × 5000 м), созданная в лицензионном программном комплексе «MODLOW v. 4.5» (Schlumberger Water Services, Канада) содержит пять пластов с углами падения, соответствующими их горно-геологическим условиям. Мощности продуктивных толщ на модели принимались в соответствии с зависимостью проницаемости подработанного породного массива от кратности его подработки (в среднем 10–40 мощностей угольного пласта).

Для задания внешних границ моделируемой области использовались рекомендации, приведенные в работах [5, 6], согласно которым тектоническое нарушение (Новгородовский сброс на севере шахтного поля) является экраном на пути движения подземных вод. Это определяет необходимость задания на участке сброса непроницаемой в гидродинамическом отношении границы. На юго-западе и юго-востоке, где угольные пласты имеют непосредственную гидравлическую связь с обводненными палеоген-неогеновыми отложениями, необходимо задание граничного условия третьего рода, отражающего взаимосвязь величины расхода

потока подземных вод палеоген-неогенового горизонта в продуктивную толщу с разностью гидродинамических напоров в них. При этом сопротивление, обуславливающее взаимосвязь расходов и разности напоров на выходах угольных пластов, определяется по суммарной величине проницаемости пластов и палеоген-неогеновых отложений, пересчитанной в соответствии с размерами расчетных блоков (рис. 4).

Внутренними границами в модели шахты № 2 «Новгородовская» являются очистные выработки, отображаемые граничными условиями первого рода с величиной гидродинамического напора, равной абсолютной отметке почвы угольных пластов. Положение этих границ на модели определялось путем построения плана горных выработок в программной среде AutoCAD и переноса контуров выемочных участков на моделируемые слои. При моделировании работы шахты после отключения водоотлива внутренние граничные условия не задавались.

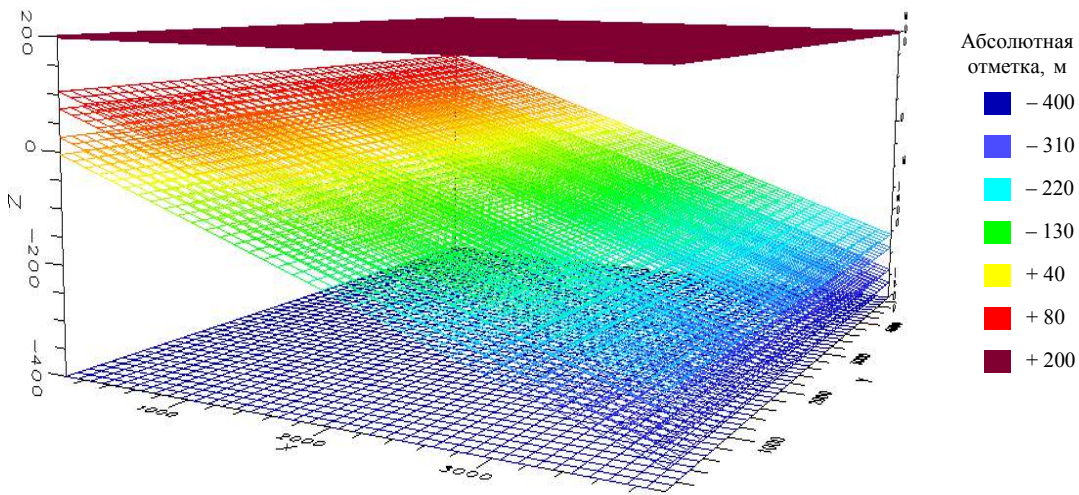
Исходя из существующих теоретических представлений [7] о проницаемости отработанного породного массива, величина пористости и коэффициента фильтрации в пределах моделируемых горных выработок была задана увеличенной в среднем в 7–10 раз по сравнению с зонами вне ведения горных работ. Шаг дискретизации модели по пространству составил 100 × 100 м (всего 2000 блоков), что позволило достаточно точно учесть конфигурацию выработок в пределах отрабатываемых пластов в масштабе шахты, при этом шаг по времени не превышал 20 сут. Инфильтрация атмосферных осадков в верхнем слое модели задавалась величиной 25 % от их среднегодового количества в регионе (125 мм/год).

Для адекватного прогноза водопритоков в процессе затопления шахты на разрабатываемой модели было выполнено эвристическое моделирование, цель которого состояла в корректировке гидродинамической роли внешних границ водоносных пластов и их фильтрационных свойств. При этом значения гидродинамических параметров водоносных пластов были характерны гидрогеологическим условиям

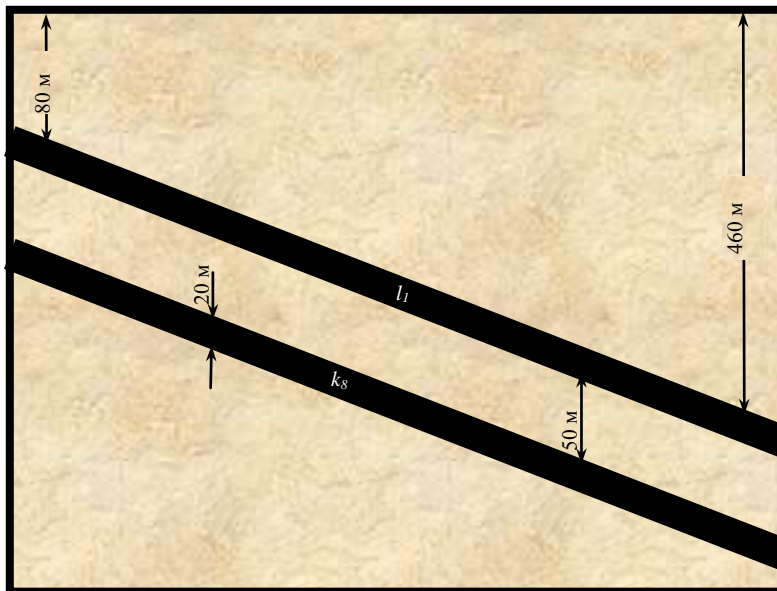


шахты № 2 «Новгородовская». Основой для вариации этих параметров послужили результаты опытно-фильтрационных

работ и измерений шахтных водопритоков, полученные ПГП «Артемовская гидрогеологическая партия» [1] во время



*a*



*б*

Рис. 4. Трехмерное представление геометрии моделируемой области (*a*) и схематический разрез поля шахты № 2 «Новгородовская» (*б*)

первого этапа работы шахты.

Решение обратной (эпигнозной) задачи производилось в условиях нестационарного режима фильтрации, основным критерием правильности решения которой являлось сходство фактических и модельных величин затопления шахтного ствола (рис. 5). Результаты решения показывают, что на модели удалось практически полностью отразить динамику

подъема уровня воды в системе горных выработок на протяжении третьего этапа эксплуатации шахты. При этом абсолютная погрешность между фактическими и модельными данными уровней находится в пределах 3–11 м, а относительная погрешность не превышает 10 % (табл. 2). На рис. 6 показано модельное распределение уровня подземных вод на территории шахтного поля до и после прекращения

водоотлива (по состоянию на 15.04.2012 г., спустя 2000 сут), а также его промежуточные положения на протяжении периода затопления.

Таблица 2

**Погрешность определения динамики подъема уровня воды в системе горных выработок при затоплении шахты № 2 «Новгородовская» по результатам моделирования**

| Время с начала затопления, сут. | Абсолютная отметка зеркала затопления, м |           | Абсолютная погрешность, м | Относительная погрешность, % |
|---------------------------------|--|-----------|---------------------------|------------------------------|
|                                 | фактическая                              | на модели |                           |                              |
| 300                             | -120,5                                   | -110,45   | 10,05                     | 8,34                         |
| 900                             | -1,15                                    | -1,05     | 0,1                       | 8,69                         |
| 1200                            | 25,4                                     | 22,9      | 2,5                       | 9,84                         |
| 1500                            | 95,1                                     | 92,12     | 2,98                      | 3,13                         |
| 1800                            | 110,8                                    | 99,85     | 10,95                     | 9,88                         |
| 2000                            | 109,72                                   | 113,3     | 3,58                      | 3,16                         |

Анализ распределения уровня подземных вод показывает, что до отключения водоотлива воронка депрессии повторяет контуры зон отработки. Наибольшие понижения приурочены к зонам, где объем выработанного пространства больше. По мере затопления отмеченные закономерности сглаживаются, при этом подъем уровня подземных вод про-

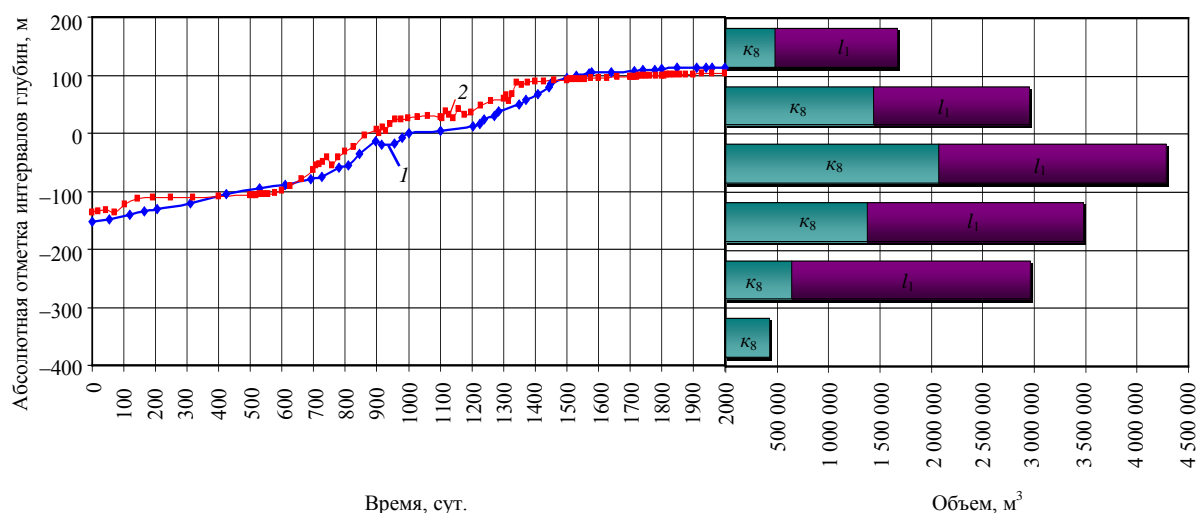


Рис. 5. Динамика затопления выработанного пространства по пластам  $\kappa_8$  и  $l_1$  шахты № 2 «Новгородовская»: 1, 2 – соответственно темп подъема уровня подземных вод по данным мониторинга и моделирования

исходит неравномерно, с замедлением в интервалах наибольшей концентрации горных выработок.

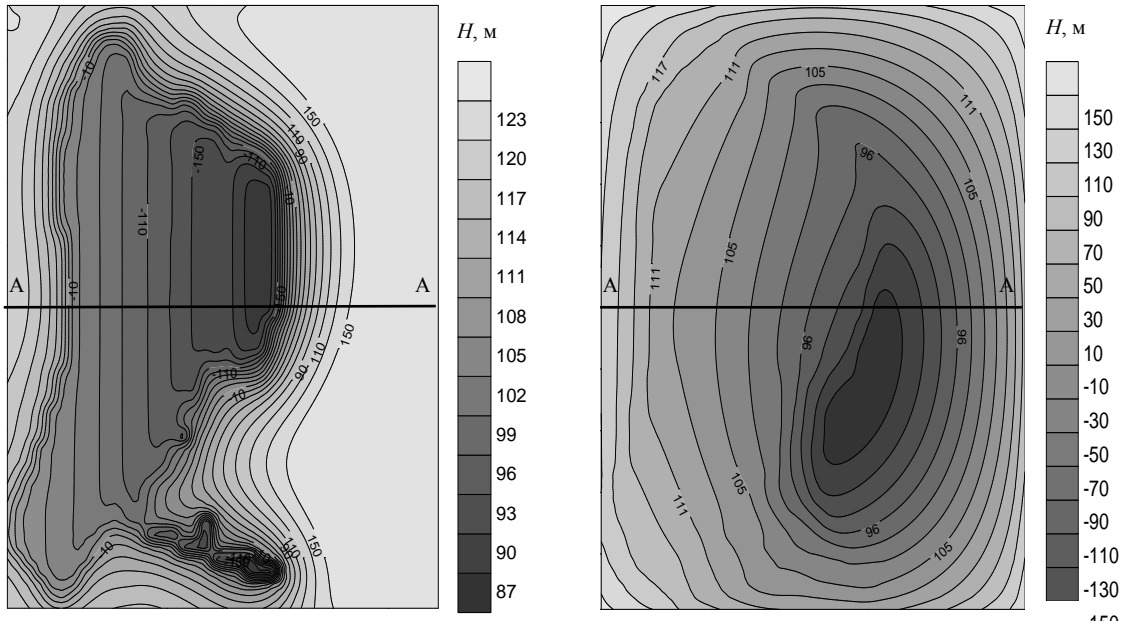
Разработанная геофильтрационная модель шахты № 2 «Новгородовская» адекватно отображает динамику затопления выработок с учетом специфики горно-геологических и гидрогеологических условий участка. С помощью предложенного подхода представляется возможным рассчитывать изменение уровня режима и температуры подземных вод в различных горизонтах шахты при использовании ее для создания гидротермального модуля.

Итак, учет проектных потерь, обусловленных горно-техническими условиями разработки, и забалансовых запасов углей свит  $C_2^6$  и  $C_2^5$ , позволил установить, что на сегодняшний день в пределах затопленной шахты № 2 «Новгородовская» находится более 8 млн т угля, сосредоточенного в некондиционных и маломощных пластах  $\kappa_7^5$ ,  $\kappa_8^H$ ,  $l_4$ ,  $l_5$  и пригодного по своим физико-химическим характеристикам для разработки способом подземного сжигания.

Наличие в пределах шахтного поля двух промышленных пластов ( $\kappa_8$  и  $l_1$ ),

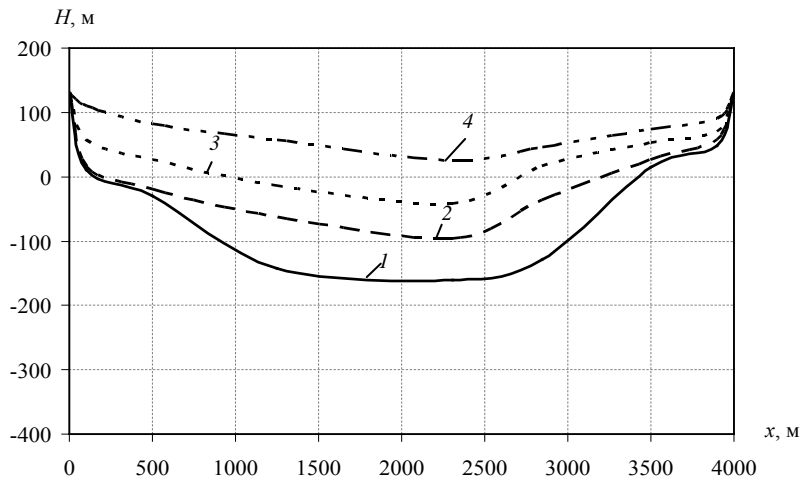
залегаящих под гидравлически связанными водоносными горизонтами, определило подход к геофильтрационной схематизации шахтного поля. Разработанная конечно-разностная модель геофильтрации подработанной территории охватыва-

ет площадь 20 км<sup>2</sup> и воспроизводит влияние отработанных горизонтов, а также разделяющего слоя между ними, кровли пласта  $l_1$  и подошвы пласта  $k_8$ . Результаты решения обратной задачи показали, что модель практически полностью ото-



*a*

*б*



*в*

Рис. 6. Уровень подземных вод ( $H$ , м) на шахтном поле до отключения водоотлива (*a*), спустя 2000 сут. после его прекращения (*б*) и в промежуточные моменты времени вдоль профиля  $A-A$  (*в*):  
1–4 – соответственно спустя 100, 700, 1000 и 1500 сут. после остановки водоотлива

бражает динамику подъема уровня воды в системе затопливаемых горных выработок. Абсолютная погрешность между фактическими и модельными данными

положения уровней находится в пределах 3–11 м, а относительная погрешность не превышает 10 %. На основе разработанной модели геофильтрации было установ-



лено распределение уровня подземных вод на территории шахтного поля до и после прекращения водоотлива, а также возможность выполнения прогноза изменения гидродинамического режима шахты при использовании ее вод с помощью теплоэнергетического модуля в качестве теплоносителя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заключение о результатах работы «Прогноз изменения эколого-гидрогеологических условий в границах горных отводов шахты № 2 «Новгородовская», которая ликвидируется, ликвидированной шахты «Селидовская» и шахты им. Д. С. Коротченко, которая подлежит ликвидации, а также смежных с ними действующих шахт: отчет Артемовской гидрогеологической партии / Н. А. Краснопольский. Артемовск. 2006. 130 с.
2. Wieber G. A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif / G. Wieber, S. Pohl // Mine Water: In: Technical University of Ostrava Faculty of Mining and Geology, In: Proceedings of the 10th IMWA Congress – 2008. in Karlovy Vary, Check Republic, 113–116 p.
3. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 1. Угольные бассейны и месторождения юга Европейской части СССР / Лагутина В. В. [и др.]. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 1210 с.
4. Подземная газификация угольных пластов / Е. В. Крейнин [и др.]. М.: Недра, 1982. 151 с.
5. Садовенко И. А., Рудаков Д. В. Динамика фильтрационного массопереноса при ведении и свертывании горных работ. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2010. 216 с.
6. Ермаков В. Н., Улицкий О. А., Спожакин А. И. Изменение гидродинамического режима шахт при затоплении // Уголь Украины. 1998. № 6. С. 11–13.
7. Садовенко И. А. Синтезирование численных моделей при решении задач управления геофильтрационным состоянием горного массива // Известия вузов. Геология и разведка. 1991. № 12. С. 19–22.

Поступила в редакцию 11 февраля 2014 г.

**Садовенко Иван Александрович** – доктор технических наук, профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии. 49600, Украина, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19, Национальный горный университет.

**Инкин Александр Викторович** – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры гидрогеологии и инженерной геологии. 49600, Украина, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19, Национальный горный университет. E-mail: [inkin@ua.fm](mailto:inkin@ua.fm).

**Рудаков Дмитрий Викторович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии. 49600, Украина, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19, Национальный горный университет.

**Хрипливец Юлия Владимировна** – аспирант кафедры гидрогеологии и инженерной геологии. 49600, Украина, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19, Национальный горный университет.