

УДК 622.278, 662.73

И. А. Садовенко, д-р техн. наук, А. В. Инкин, канд. техн. наук,
Д. В. Рудаков, д-р техн. наук, Ю. В. Хрипливец

ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепрпетровск, Украина

Моделирование работы теплового модуля в условиях ликвидируемой шахты

На основе разработанной геофильтрационной модели шахты «Новгородовская 2» рассчитана температура и тепловая энергия подземных вод в затопленных горных выработках. Установлена возможность активизации их теплового ресурса с помощью подземного сжигания остаточных запасов угля сосредоточенных в некондиционных и маломощных пластах. По результатам расчетов показано, что количество тепловой энергии вырабатываемой термомодулем, расположенным на территории шахты может полностью покрыть тепловые потребности близлежащего к ней города в течение отопительного периода.

Ключевые слова: затопленная шахта, сжигание угля, подземные воды, тепловая энергия.

Введение. Одним из кардинальных направлений реструктуризации угольной отрасли Украины и восстановления природного режима в угледобывающих регионах является консервация отработанных и нерентабельных шахт. Так, согласно "Инвестиционной программе развития угольной промышленности" на территории Донбасса намечены к ликвидации 64 угольных предприятия, большая часть из которых уже закрыта [1], благодаря чему множество небольших шахтерских городов на фоне постоянно растущих цен на бензин и дизтопливо стали ощущать острую нехватку в тепловой энергии. Примером сложившейся ситуации может служить ликвидация шахты «Новгородовская 2» в Красноармейском углепромышленном районе и вызванные этим перебои в отоплении и горячем водоснабжении зданий расположенных в городе Новгородовка находящемся в 10 км от шахты. Для решения этой проблемы в работе [2] уже была показана возможность применения подземных вод затопленных выработок для отопления промышленных и гражданских объектов. На основе анализа горнотехнических условий и геолого-гидрогеологических особенностей шахты в программном комплексе «MODLOW v. 4.5» была создана численная модель геофильтрации отражающая положение уровня шахтных вод до и после прекращения водоотлива. Полученные данные позволяют выполнить моделирование гидротермодинамических процессов в пределах выделенного участка для обоснования технологических вариантов использования теплового ресурса шахтных вод, активизированного за счет подземного сжигания угля, для теплоснабжения города путем отбора и закачки воды через вертикальные горные выработки на территории шахтного поля.

Материал и результаты исследований. С помощью численной гидрогеологической модели шахты «Новгородовская 2», подробное описание которой приведено в работе [2], был выполнен прогноз положения уровня шахтных вод на настоящий момент времени (15.01.2014 г) и предполагаемое время запуска в работу теплового модуля (01.06.2014 г). На рис. 1 показано прогнозное положение уровня подземных вод, в пределах поля шахты по результатам моделирования. Анализ распределения уровней показывает их незначительное повышение со временем.

Для оценки эффективности работы теплового модуля необходимо определить естественный тепловой потенциал затопленной шахты „Новгородовская 2”. В первом приближении можно принять [3], что гидродинамические параметры пластов не зависят от процессов теплопереноса, а температура воды и скелета пород совпадают в каждой точке. Считаем, что в пределах шахтного поля движение шахтных вод осуществляется по затопленным выработкам, теплообмен в расчетной плоскости отсутствует [4], ось H направлена вниз (рис. 2). Снизу из глубины в обводненные горные выработки поступает тепловой поток q , вызванный выделением тепла в земных недрах. Сверху ниже 6-7 м от дневной поверхности залегает нейтральный слой пород, температура которого постоянна и равна среднегодовой температуре в регионе ($\approx +10^\circ\text{C}$). При данных условиях

дифференциальное уравнение теплопроводности относительно оси H с учетом конвекции имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial H^2} - \frac{V}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial H} = 0, \quad (1)$$

при следующих граничных условиях

$$\begin{aligned} T &= T_1 \text{ при } H = H_1, \\ q &= -\lambda \partial T / \partial H \text{ при } H = H_2. \end{aligned}$$

Общее решение уравнения (1) при заданных граничных условиях имеет вид [4]

$$T = T_1 + \frac{q}{\lambda B} [\exp B(H - H_2) - \exp B(H_1 - H_2)], \quad B = \frac{V}{a} \quad (2)$$

При этом тепловой потенциал шахтных вод содержащихся в затопленных выработках определяется из выражения.

$$Q = c \cdot \rho \cdot t \cdot V_{об} \quad (3)$$

В соотношениях (1)-(3): T_1, H_1 – соответственно температура и расстояние до нейтрального слоя; H – глубина залегания; a, λ – температуропроводность и теплопроводность водонасыщенных пород соответственно; V – вертикальная скорость фильтрации; Q – количество теплоты; $c, \rho, t, V_{об}$ – удельная теплоемкость, плотность, температура и объем шахтных вод соответственно.

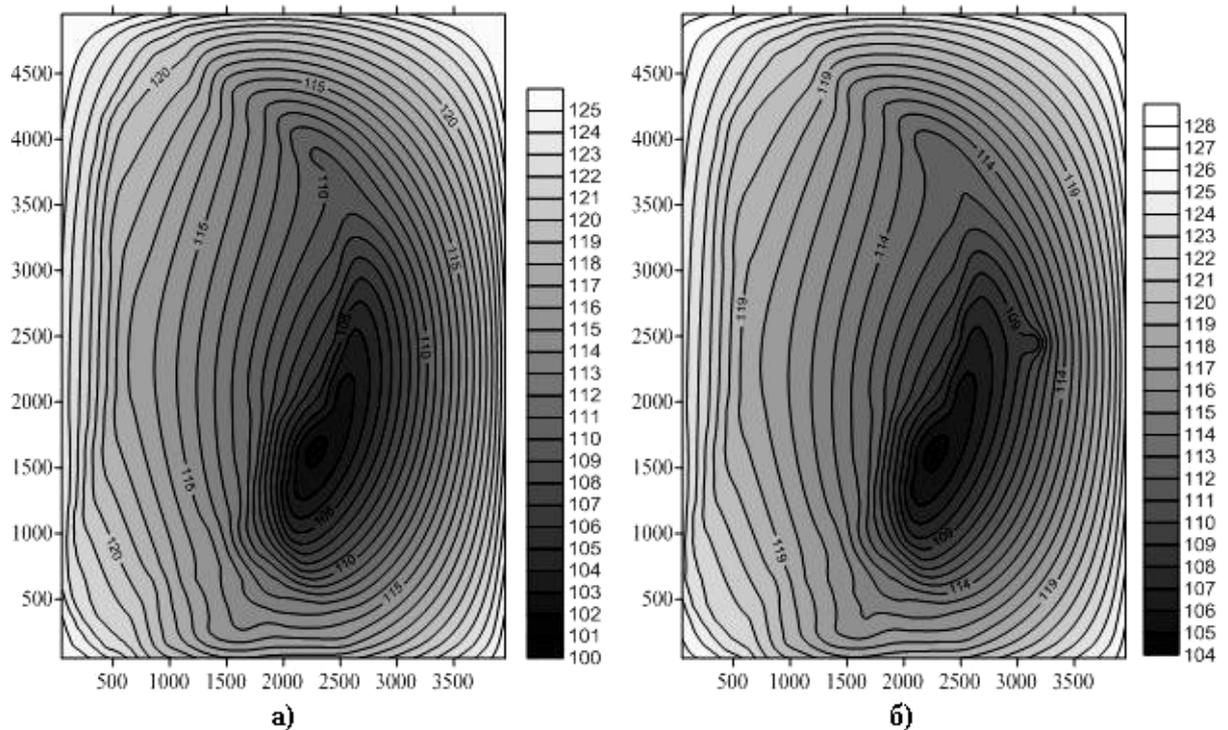


Рис. 1. Прогнозное положение уровня подземных вод (абс. отм. м – оттенки серого цвета) в пределах шахтного поля на 15.01.2014 г (а) и начало работы гидрогеотермального модуля (б)

На рис. 3 показана рассчитанная по формулам (2) - (3) температура и естественный тепловой потенциал шахтных вод содержащихся в затопленных выработках. Необходимо отметить, что результаты расчетов хорошо согласуются с фактическими данными, полученными производственным геологоразведочным предприятием "Артемовская гидрогеологическая партия" в ходе замеров температуры на различных горизонтах, а общее количество тепловой энергии аккумулированной шахтными водами в среднем составляет 1300 ТДж.

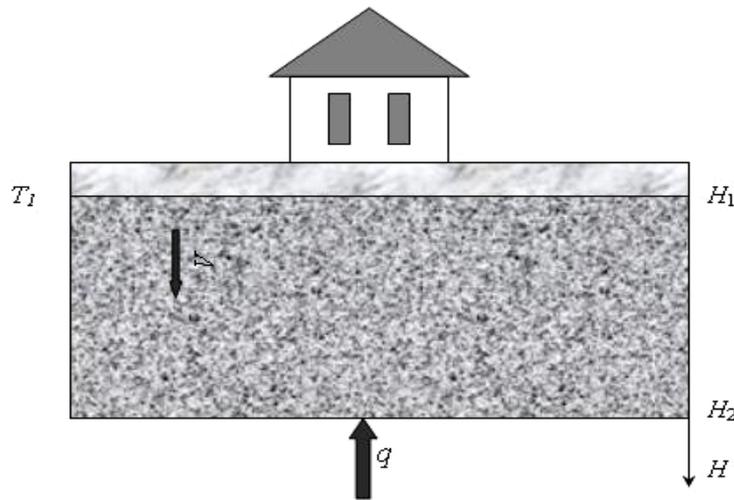


Рис. 2. Схема для расчета теплового потока подземных вод в пределах шахтного поля

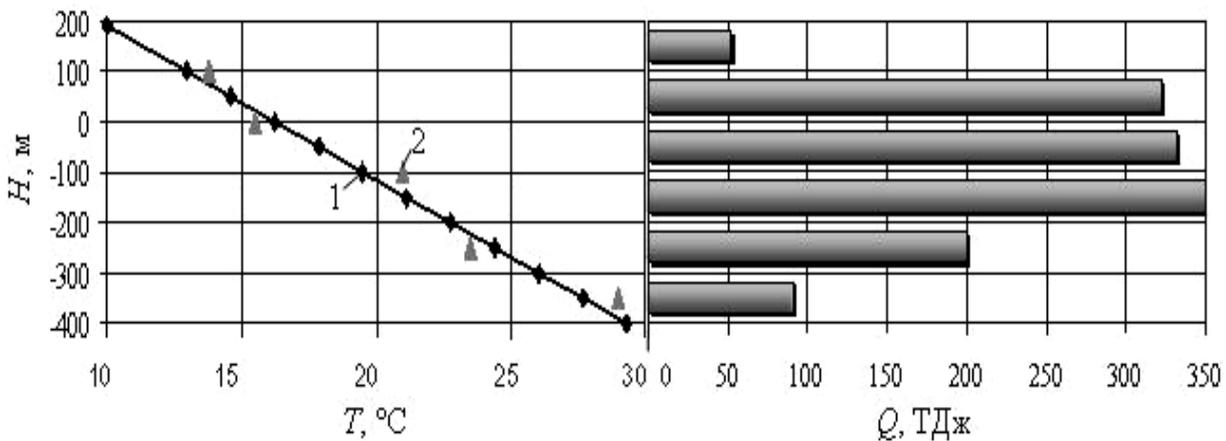


Рис. 3. Изменение температуры (T) и количества теплоты подземных вод (Q), находящихся в затопленных выработках шахты „Новгородовская 2”: 1, 2 – соответственно расчетные и фактические данные

Использование низкопотенциального тепла шахтных вод затопленных горных выработок с помощью геомодуля может рассматриваться в двух технологических вариантах. Первый связан с освоением естественного теплового ресурса шахты „Новгородовская 2”, второй – с его дополнительной активизацией за счет подземного сжигания остаточных запасов угля в пределах шахтного поля (рис. 4). Для достижения максимальной эффективности обе технологические схемы должны быть согласованы с годовым графиком потребления энергоносителей в г. Новгородовка..

Ввод модуля в работу планируется 01.06.2014 г. В этот период подземные воды сосредоточенные в затопленных горных выработках в интервале $\pm 0 \div + 100$ м и имеющие среднюю температуру $+ 10$ °С (рис. 3) через куст "холодных" скважин расположенных на территории шахтного поля (№ 1411, 1817, 1874, 2113, 2224) откачиваются на дневную поверхность и поступают в оросительные форсуночные камеры для охлаждения воздуха. После чего, нагретыми в результате кондиционирования зданий до температуры наружного воздуха (25-30 °С) они через куст "теплых" скважин (№ 3665, 3661, 3367, 3929, 3973) возвращаются в затопленные выработки, но уже на горизонт $-300 \div - 400$ м и температурой 30 °С (рис. 4). Спустя два месяца после прекращения охлаждения зданий (окончание лета) вода из нижних горизонтов через "теплые" скважины вновь подается на дневную поверхность для обогрева сооружений по системе "теплый пол". Отдав низкопотенциальную тепловую энергию и остыв до 7° С отработанные воды через "холодные" скважины вновь поступают на горизонт $\pm 0 \div + 100$ м. Продолжительность этого этапа эксплуатации гидрогеотермального модуля составляет пять месяцев (ноябрь-март), после чего следует двухмесячный период простоя на протяжении которого могут проводиться ремонтно-профилактические ра-

боты. Усредненные данные о предполагаемых годовых дебитах 10 скважин на территории поля шахты „Новгородовская 2” приведены в табл., знак "+" в которой соответствуют закачке воды в горные выработки, а "-" – ее отбору.

Эффективность создания и эксплуатации геомодуля напрямую зависит от соотношения его горнотехнических, гидрогеологических и термодинамических параметров с технологическими условиями работы и возможными тепловыми нагрузками, возникающими при отоплении г. Новгородовка. Согласно результатам, полученным в работе [5] среднее потребление тепловой энергии во время отопительного периода в поселке городского типа с 3 тысячами жителей в подобных климатических условиях составляет 5 ГДж/час. Для города Новгородовка с населением 15 тыс. чел эта величина соответственно будет равна 25 ГДж/час, что составляет приблизительно 100 ТДж тепла за весь период отопления и менее 10 % естественного теплового ресурса затопленной шахты (1300 ТДж). Однако, не смотря на имеющийся значительный запас тепловой энергии, вызванный разностью между теплом заключенном в обводненных выработках и необходимым для обогрева зданий, использование шахтных вод по первому технологическому варианту на практике сопряжено с рядом трудностей. Прежде всего, это связано с недостаточной температурой воды обуславливающей малую теплопроизводительность и эффективность геомодуля. Увеличение дебитов и числа скважин на территории шахтного поля не приведет к необходимым результатам в виду несоответствия температуры шахтных вод показателям, необходимым для теплоснабжения сооружений, без дополнительного подогрева.

Вместе с тем, нагрев вод затопленных выработок до кондиционного состояния (например, без применения тепловых насосов) возможен при работе геомодуля по второму технологическому варианту, предполагающему повышение их температуры за счет подземного сжигания остаточных запасов угля. Сжигание некондиционных и маломощных пластов залегающих в пределах поля шахты „Новгородовская 2” (k_7^5 , k_8^4 , l_4 и l_5) предполагается производить во время отопительного периода по технологии подробно описанной в работах [6, 7], с одновременным отбором нагретых вод из вышерасположенных затопленных выработок. При этом установление пространственно-временной динамики формирования термальных ореолов в затопленном массиве вызванных отбором и закачкой разнотемпературных вод, а также тепловым потоком, поступающим из реакционного канала при подземном сжигании угля, позволит наиболее полно использовать тепловой потенциал шахты и минимизировать потери термальной энергии, связанные с взаимовлиянием "холодных" и "теплых" гидрогеотермических полей.

Моделирование процессов теплопереноса при использовании шахтных вод в качестве теплоносителей выполнено на основе разработанной и протестированной геофильтрационной модели шахты «Новгородовская 2» [2]. Необходимо отметить, что адекватность и корректность такого подхода к решению задач аккумуляции тепловой энергии в водоносных горизонтах была обоснована в работах [8, 9].

На рис. 5 приведены гидрогеотермальные поля, формирующиеся в затопленных горных выработках при использовании шахтных вод в качестве теплоносителей и подземном сжигании некондиционных угольных пластов для повышения их теплового ресурса. Их анализ позволяет количественно оценить длительность периодов прогрева подземных вод и их охлаждения в процессе отбора теплой воды. Согласно расчетам, к моменту завершения отопительного периода (спустя 2 месяца после прекращения сжигания угля) температура воды в затопленных горных выработках не опустится ниже 65°C и останется пригодной для отопления гражданских и промышленных объектов. Из этого следует вывод, что суммарные потери тепла (диссипация) через кровлю и подошву вмещающих пород в период аккумуляции тепловой энергии в затопленных горных выработках весьма незначительны.

Табл. 1 – Годовой цикл суммарного расхода шахтных вод по скважинам теплового модуля ш. Новгородовская 2”.

Скважины	Расход шахтных вод по месяцам, м ³ /сут											
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Отопление					Простой		Охлаждение			Простой	
"Холодные"	+ 2000					–	–	- 3350			–	–
"Теплые"	- 2000					–	–	+ 3350			–	–

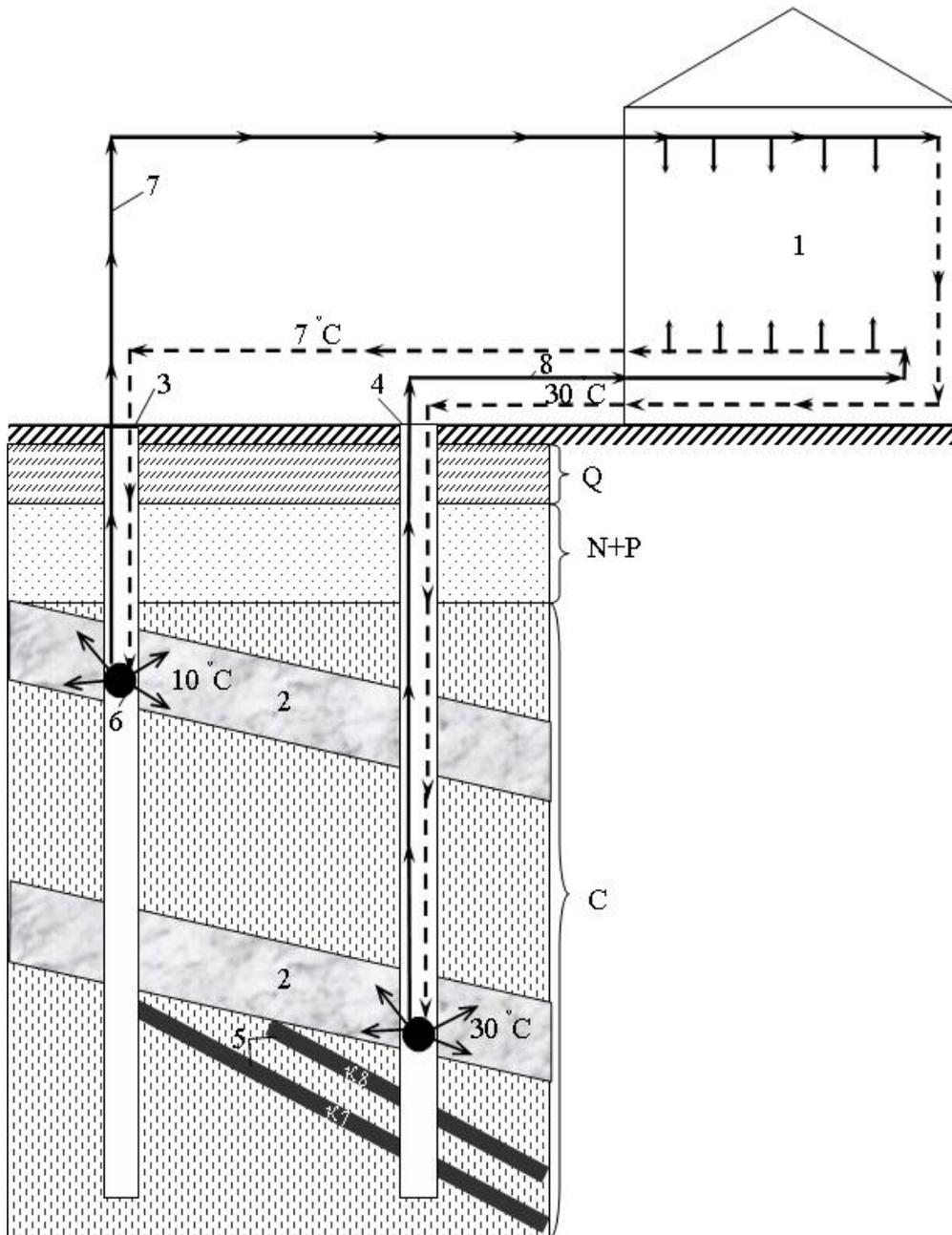


Рис. 4. Технологическая схема гидрогеотермального модуля на территории поля шахты „Новгородовская 2“: 1 – здание; 2 – продуктивная толща с затопленными горными выработками; 3, 4 – соответственно "холодная" и "теплая" скважина; 5 – некондиционные угольные пласты, предназначенные для подземного сжигания; 6 – пакер; 7, 8 – путь движения шахтных вод из "холодной" и "теплой" скважины соответственно

Более заметны потери тепла после двухмесячного простоя и закачки воды летом. Так, в результате смешения вод нагретых при подземном сжигании углей ($\approx 80-90\text{ }^{\circ}\text{C}$) и охлаждения зданий ($\approx 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) температура воды в затопленных выработках не превышает $48\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако на эффективность работы геомодуля это скажется незначительно в виду их последующего нагрева до кондиционных показателей путем сжигания угля в отопительный период. В целом теплопроизводительность скважин может быть определена из выражения

$$Q_{\text{скв}} = c \cdot q_{\text{скв}} (t_{\text{пост}} - t_{\text{отп}}), \quad (4)$$

где $q_{\text{скв}}$ – суммарный дебит куста скважин; $t_{\text{пост}}$, $t_{\text{отп}}$ – температура поступающей и отработанной воды соответственно.

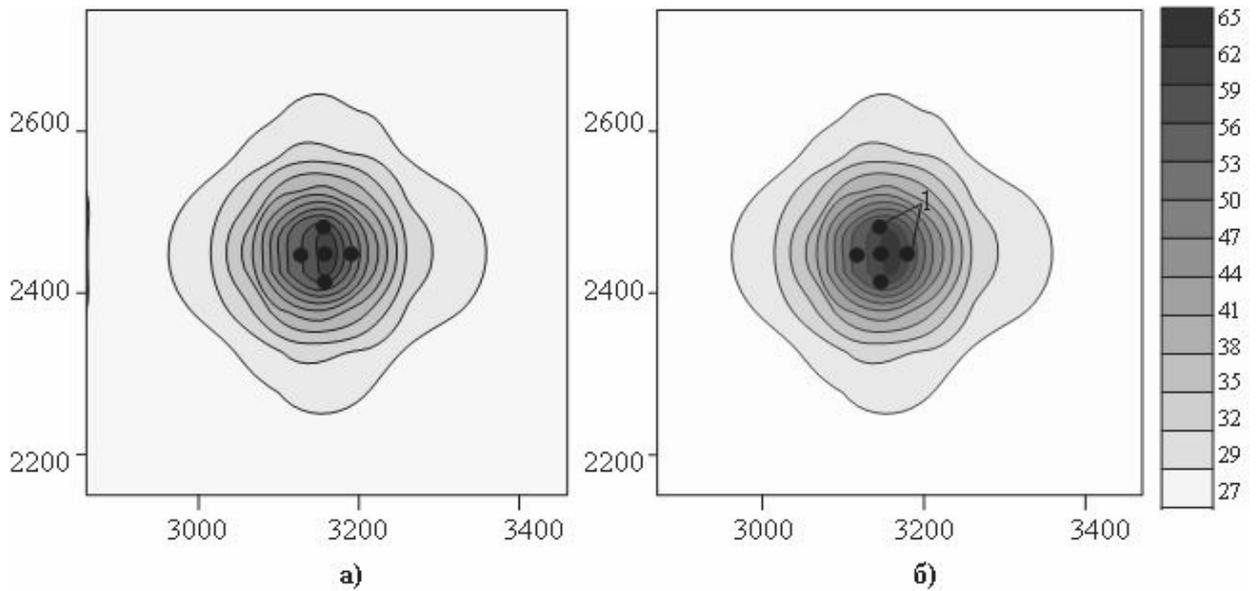


Рис. 5. Распределение температуры шахтных вод ($^{\circ}\text{C}$ – оттенки серого цвета) вблизи (расстояния в метрах) куста «теплых» скважин 1: а, б – соответственно к концу отопительного и летнего периода

Количественные показатели тепловой энергии вырабатываемой тепловым модулем, расположенным на территории поля шахты „Новгородовская 2” при его работе в отопительный период по первому и второму технологическому варианту представлено на рис. 6. Там же, для сравнения, показана в тепловом эквиваленте мощность, затрачиваемая тепловым насосом для нагрева шахтных вод, полученных по первому варианту до кондиционных показателей и теплопотребление г. Новгородовка. Коэффициент преобразования теплового насоса принимался в соответствие с разностью температур эксплуатируемых теплоносителей равным трем.

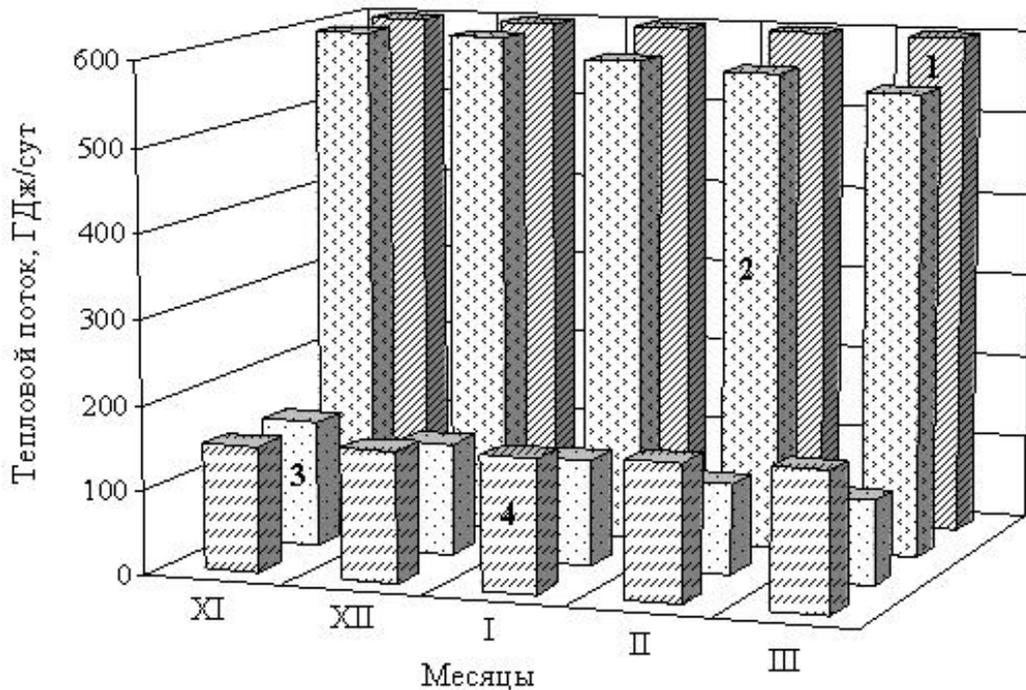


Рис. 6. Производительность теплового модуля на территории поля шахты „Новгородовская 2” в отопительный период: 1 – тепловой поток необходимый для обогрева города Новгородовка; 2, 3 – соответственно количество тепловой энергии вырабатываемое модулем по второму и первому технологическому варианту; 4 – эквивалент мощности, необходимой для нагрева шахтных вод используемых по первому варианту работы геомодуля в тепловом насосе до кондиционных показателей

Анализ рис. 6 показывает, что тепловой ресурс, вырабатываемый геомодулем по второму варианту, практически полностью покрывает тепловые потребности, возникающие во время отопительного периода в г. Новгородовка. Это дает основание рассматривать данную технологическую схему как наиболее перспективную для использования ресурса затопленной шахты „Новгородовская 2”. В случае работы геомодуля по первому варианту получаемый тепловой поток не превысит 150 ГДж/сут, что создаст дефицит теплоснабжения около 450 ГДж/сут. Эффективность первой технологической схемы может быть повышена путем отопления сооружений по системе "теплый пол" или дополнительного нагрева шахтных вод тепловыми насосами. При этом затраты энергии на подогрев теплоносителей до кондиционных показателей в насосах в среднем составят 130-160 ГДж/сут, что втрое меньше возникающего дефицита теплоснабжения.

Выводы. Моделированием теплопроводности рассчитана температура и естественный тепловой потенциал подземных вод, содержащихся в затопленных выработках шахты „Новгородовская 2”. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с фактическими данными, а общее количество тепловой энергии, аккумулированной шахтными водами, в среднем составляет 1300 ТДж. Для эффективного использования низкопотенциального тепла шахтных вод обоснованы два технологических варианта работы геомодуля. Первый связан с освоением естественного теплового ресурса шахты. Второй – с его дополнительной активизацией за счет подземного сжигания остаточных запасов угля.

Моделирование теплопереноса при использовании шахтных вод в качестве теплоносителей, выполненное с учетом изменения интенсивности теплового потока поступающего из реакционного канала в затопленные горные выработки, позволило установить, что тепловая энергия, вырабатываемая геомодулем, может полностью покрыть тепловые потребности города с населением 15 тыс. жителей в течение отопительного периода. Использование естественных тепловых ресурсов шахтных вод для отопления зданий без подземного сжигания угольных пластов возможно путем устройства обогрева сооружений по системе "теплый пол" или их дополнительного нагрева в тепловых насосах.

Библиографический список

1. Угольная промышленность Украины: факты, цифры, перспективы. Еженедельник 2000 [Электронный ресурс]. – 27.05.2010. – Режим доступа: <http://2000.net.ua/2000/derzhava/ekonomika/66995>. – Название с экрана.
2. Моделирование процесса затопления шахты «Новгородовская 2» для оценки возможности использования ее теплового ресурса / И.А. Садовенко, А.В. Инкин, Д.В. Рудаков, Ю.В. Хрипливец // Известия УГГУ. – 2014. – Вып. 1 (33). – С. 31-38.
3. Лялько В.И. Тепло- и массоперенос в подземных водах юго-запада русской платформы и сопредельных регионов: автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра геол.-мин. наук: спец. 04.125 "Гидрогеология" / Лялько Вадим Иванович; Инст. геол. наук АН УССР. – К., 1971. – 70 с.
4. Гончаров С.А. Термодинамика: учебник / С.А. Гончаров. – М: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 440 с.
5. Садовенко И.А. Термогидродинамическая оценка параметров системы подземного аккумулирования тепловой энергии / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Геотехническая механика: межведомственный сборник научных трудов; Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – 2012. – Вып. 104. – С. 110-119.
6. Садовенко И.А. Численное исследование особенностей теплового поля вокруг подземного газогенератора / И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, А.В. Инкин // Збірник наукових праць НГУ. – 2012. – № 39 – С. 11-20.
7. Садовенко И.А. Миграция и теплоперенос вокруг подземного газогенератора / И.А. Садовенко, А.В. Инкин, С.В. Жолудев. – Днепропетровск: "Грани", 2012. – 282 с.
8. Садовенко И.А. Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии / И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, А.В. Инкин // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 1. – С. 40-45.
9. Садовенко И.А. Оценка эффективности теплового модуля на основе ресурсного потенциала затопленной шахты / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 3/2013 (80). – С. 123-127.

Надійшла до редакції 14.04.2013

І. О. Садовенко, О. В. Інкін, Д. В. Рудаков, Ю. В. Хрипливець
ДВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, Україна

Моделювання роботи теплового модуля в умовах ліквідовуваної шахти

На основі розробленої геофільтраційної моделі шахти "Новгородівська 2" розрахована температура і теплова енергія підземних вод в затоплених гірничих виробках. Встановлена можливість активізації їх теплового ресурсу за допомогою підземного спалювання залишкових запасів вугілля, зосереджених в некондиційних і малопотужних пластах. Результати розрахунків показують, що кількість теплової енергії яка виробляється термомодулем, розташованим на території шахти може повністю покрити теплові потреби суміжного міста впродовж опалювального періоду.

Ключові слова: затоплена шахта, спалювання вугілля, підземні води, теплова енергія.

I.O. Sadovenko, O.V. Inkin, D.V. Rudakov, Yu. V. Hriplivets
National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

Designing the work of a thermal module at a liquidated mine

On the basis of the developed geofiltrational model of "Novogradovskaya 2" mine we calculated the temperature and heat of groundwater in flooded mine workings. There is the possibility to enhance their thermal resource using underground combustion of residual coal reserves concentrated in sub-standard and thin seams. The results of the calculations showed that the amount of thermal energy generated by the thermal module located on the territory of the mine can completely cover the needs of the nearby city during the heating season.

Keywords: flooded mine, coal combustion, underground water, thermal energy.