

УДК 622.278

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО МОДУЛЯ
НА ОСНОВЕ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЗАТОПЛЕННОЙ ШАХТЫ****И. А. Садовенко, А. В. Инкин, Д. В. Пилогин**Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет"
просп. К. Маркса 19, г. Днепропетровск, 49600, Украина. E-mail: inkin@ua.fm

Исследован механизм образования техногенного геотермального месторождения в затопленном шахтном поле за счет подземного сжигания некондиционных угольных пластов. Обоснованы важные технологически аспекты и определены особенности формирования термогидродинамических условий вокруг генератора при подземном сжигании угля. Описаны фазовые состояния и динамика перемещений фаз в зоне газового и температурного воздействия огневого забоя. Оценен баланс тепла при его накоплении и отборе с использованием подземных вод как теплоносителя и герметизатора подземного теплоэнергетического модуля. Для горно-геологических условий шахты «Ольховая–Западная» Донецкого бассейна с помощью программы численного моделирования ModFlow 2009 оценены эксплуатационные запасы тепловой энергии, аккумулирующейся в водоносных горизонтах вмещающих пород. Установлено, что разработка этих ресурсов позволит осуществлять теплоснабжение жилищно-коммунального сектора и обеспечит получение прибыли от работы теплоэнергетического модуля в соответствии с современными экономическими критериями.

Ключевые слова: подземное сжигание угля, тепловая энергия, подземные воды.

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛООВОГО МОДУЛЯ
НА ОСНОВІ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЗАТОПЛЕНОЇ ШАХТИ****І. О. Садовенко, О. В. Інкін, Д. В. Пілюгін**Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет"
просп. К. Маркса 19, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна. E-mail: inkin@ua.fm

Досліджений механізм утворення техногенного геотермального родовища в затопленому шахтному полі за рахунок підземного спалювання некондиційних вугільних пластів. Обґрунтовані важливі технологічні аспекти і визначені особливості формування термогидродинамічних умов навколо генератора при підземному спалюванні вугілля. Описані фазові стани і динаміка переміщень фаз в зоні газової і температурної дії вогневого забою. Оцінений баланс тепла при його накопиченні і відборі з використанням підземних вод як теплоносія і герметизатора підземного теплоенергетичного модуля. Для гірничо-геологічних умов шахти «Ольхова–Західна» Донецького басейну за допомогою програми чисельного моделювання ModFlow 2009 оцінені експлуатаційні запаси теплової енергії, що акумулюється у водоносних горизонтах вміщуючих порід. Встановлено, що розробка цих ресурсів дозволить здійснювати тепlopостачання житлово-комунального сектора, і забезпечить отримання прибутку від роботи теплоенергетичного модуля відповідно до сучасних економічних критеріїв.

Ключові слова: підземне спалювання вугілля, тепла енергія, підземні води.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Согласно Национальной энергетической стратегии, до 2030 г. уголь остается основным топливным ресурсом и источником получения химического сырья в Украине [1]. При этом около 10 % его запасов (2,5 млрд. тонн) сосредоточено в некондиционных пластах, не пригодных для разработки традиционными способами. Отработка остаточных ресурсов затопленных шахт может быть осуществлена с помощью подземного сжигания угля (ПСУ), основанном на превращении его твердой массы в энергетический или химический теплоноситель. Данный способ разработки угольных месторождений позволяет совместить в едином технологическом процессе добычу полезного ископаемого с его одновременной подземной переработкой и существенно снизить риски деградации угледобывающих регионов. Однако, несмотря на ряд преимуществ и почти вековой научно-промышленный опыт развития, ПСУ до сих пор не получило широкого распространения ввиду больших потерь вырабатываемого тепла и газа в породном массиве [2]. Неконтролируемые утечки из подземного генератора приводят к непроизводительным затратам энергии и резко снижают технико-экономические показатели этой геотехнологии [3].

Для повышения КПД ПСУ в работе [4] уже была рассмотрена возможность отбора части тепла, поступающего из генератора в вышелегающий водоносный горизонт путем откачки нагретых подземных вод в качестве теплоносителя. Добываемая тепловая энергия дает возможность заменить котельные и угольные электростанции в процессе выработки тепла, идущего на внутренние нужды шахты и в ближайшие населенные пункты. По результатам моделирования фильтрации и теплопереноса в водонасыщенных породах кровли сжигаемого угольного пласта в работе [5] определена пространственно-временная динамика формирования температурных полей, а также их трансформации при закачке и отборе подземных вод в периоды сезонных колебаний потребления энергии.

Целью данной работы является обоснование технологических параметров работы теплоэнергетического модуля на основе закономерностей тепломассопереноса вокруг подземного генератора и оценка эксплуатационных запасов тепловой энергии, накапливающейся в затопленном шахтном поле за счет подземного сжигания некондиционных угольных пластов.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ІССЛЕДОВАНИЙ.
Принципиальна схема отработки угольного пласта способом ПСУ представлена на рис. 1. Вскрытие пласта производится рядами вертикальных скважин с созданием новых рядов по мере отработки ранее пробуренных. Известными способами [3] производится сбойка скважин первого ряда, и образование общего канала между ними (линии розжига). Затем производится сбойка скважин второго ряда с этим каналом. После ее завершения включается дутье, предназначенное для сжигания угля между первым и вторым рядом скважин. Огневой забой по этой линии продвигается путем подвода дутья через линию розжига в реакционный канал и отвода вырабатываемого газа из второго ряда скважин. В процессе сжигания угольного пласта, в третьем ряду скважин осуществляется сбойка со вторым с таким расчетом, чтобы сбойка произошла раньше, чем сгорит уголь между 1-м и 2-м рядами. Затем приступают к сжиганию полосы угольного пласта между 2-м и 3-м рядами скважин. В такой последовательности работы ведутся на всем участке угольного пласта, предназначенного для отработки способом ПСУ.

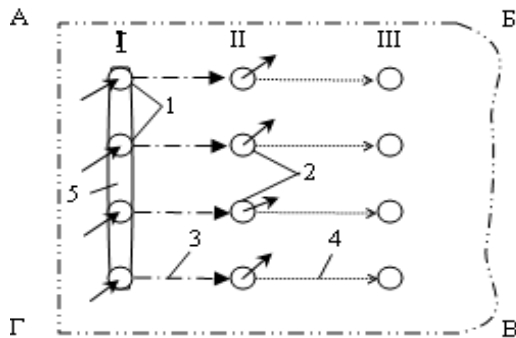


Рисунок 1 – Схема отработки участка угольного пласта способом ПСУ: АБВГ – участок сжигания угля; II – номер ряда скважин; 1, 2 – соответственно нагнетательные и отводящие скважины; 3 – движение огневой забоя; 4 – направление сбоек; 5 – линия розжига

В процессе сжигания угля вырабатываемый газ через отводящие скважины подается на дневную поверхность потребителю (рис. 2). В его горючих компонентах заключена часть тепловой энергии, образующейся в реакционном канале. Другая часть формирующегося тепла вместе с утечками газа через водоупорные породы попадает в вышележащий водоносный горизонт и нагревает подземные воды. Температура воды зависит от интенсивности сжигания и гидродинамических условий. Нагретые воды в процессе отработки угольного пласта интенсивно фильтруются к расширяющемуся в результате сгорания пространству, что значительно понижает их начальный уровень. Поступление воды из вмещающих пород происходит разными путями и зависит от термодинамических условий и фазового состояния процесса ПСУ. На приток в реакционную зону, кроме геологического строения и степени обводнения обрабатываемого участка, значительное влияние оказывает увеличение проницаемости водоупорных пород под воздействием высоких температур [6, 7]. Поступая в подземный генератор, подземные воды существенно изменяют его тепловой баланс за счет

увеличения расхода вырабатываемого тепла на испарение. Образующийся при этом перегретый пар вместе с утечками газа и парами, образовавшимися за счет подсушивания пород, фильтруется в кровлю генератора, повышает ее температуру и конденсируется. Образовавшийся конденсат смешивается с подземными водами и вновь поступает в генератор.

Завершение сжигания угольного пласта сопровождается снижением интенсивности испарения и постепенным восстановлением естественного уровня подземных вод до положения соответствующего их новому гидродинамическому равновесию. При фильтрации через нижнюю часть генератора в пределах предварительно разогретых пород кровли повышается температура воды, снижается ее плотность и образуется термальный купол, циркулирующий вокруг отработанного генератора. Таким образом, при подземном сжигании угля в покрывающих породах образуется техногенное геотермальное месторождение. Для его разработки, оценки эксплуатационных запасов и эффективного отбора содержащейся в нем тепловой энергии требуется особый подход.

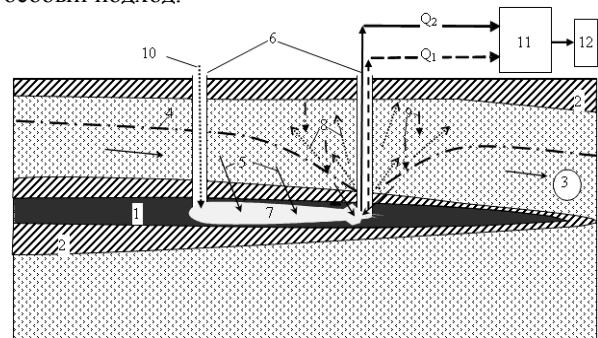


Рисунок 2 – Схема теплоэнергетического модуля на затопленном участке шахты:

Q_1 , Q_2 – соответственно дебиты воды и газа с реакционного канала к потребителям тепла; 1 – угольный пласт; 2 – водоупорные породы; 3 – водоносный горизонт; 4, 5 – уровень подземных вод и направление их фильтрации соответственно; 6 – эксплуатационные скважины; 7 – реакционный канал; 8, 9 – направление течения перегретого водяного пара и конденсата; 10 – движение дутья; 11 – блок водогазоочистки; 12 – потребитель тепла

Разработка сформировавшегося геотермального месторождения может быть осуществлена через скважины, пробуренные в процессе вскрытия угольного пласта. Для оценки эксплуатационных запасов в целом применимы гидродинамические, гидравлические и балансовые методы, используемые при разведке пресных, минеральных и промышленных вод [8]. Однако, поскольку термальные воды извлекают из недр для получения тепла, то, помимо расчета производительности водозабора, оценка запасов должна включать прогноз изменения температуры воды в процессе разработки месторождения. Кроме этого использование эксплуатационных запасов должно быть экономически рентабельно, поэтому освоение техногенных геотермальных месторождений требует обоснования технико-экономической целесообразности и концепции их разработки с учетом природных, энергетических и социальных условий региона.

В качестве примера рассмотрим работу теплоэнергетического модуля в горно-геологических условиях затопленного участка поля шахты «Ольховая–Западная» Донецкого бассейна. Оценке подлежат эксплуатационные запасы тепловой энергии, накапливающейся в обводненных толщах «бабаковских» песчаников $h_{10}Sh_{11}$ при сжигании некондиционного угольного пласта h_{10}^1 . Отсутствие данных об источниках формирования и поступления подземных вод на данной территории не позволяет использовать балансовый метод при решении поставленной задачи. Однако проведенные на участке опытно-фильтрационные работы дают возможность воспользоваться комбинацией гидравлического и гидродинамического методов, что является приемлемым в гидрогеологической практике. В результате пробных и опытных откачек были определены коллекторские свойства водоносного горизонта, на основании которых в программе ModFlow 2009 была создана численная модель фильтрационного теплопереноса на исследуемом участке, позволяющая описывать гидродинамические и тепловые процессы при ПСУ [5].

На рис. 3 представлены результаты моделирования, отражающие изменение температуры подземных вод вследствие сжигания угольного пласта в течение 30 сут. Анализ графиков показывает, что пики температур со временем удаляются от реакционного канала по направлению фильтрационного потока. Работа эксплуатационных скважин на модели назначалась соответственно их положению с целью максимального отбора накопившейся в водоносном горизонте тепловой энергии. В период с 30 до 50 сут. откачка задавалась вблизи отработанного генератора, с 50 до 60 сут. на удалении 25 м, с 60 до 110 сут. – 50 м, с 110 до 130 сут. – 75 м. Дебит скважин ($100 \text{ м}^3/\text{сут}$) и общая продолжительность откачки нагретых вод (100 сут., декабрь–февраль) принимались в соответствии с гидродинамическими условиями участка и годовой динамикой потребления тепловой энергии жилищно-коммунальным сектором.

Так как проектируемый водозабор нагретых вод будет работать в режиме постоянного отбора, то для обеспечения эксплуатационных запасов необходимо, чтобы максимальное расчетное понижение их уровня не превысило допустимой величины (половины мощности водоносного пласта). При этом температура воды в течение всего срока потребления должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к теплоносителям, предназначенным для промышленного и коммунального теплоснабжения ($T = 40\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$) [8]. Для оценки этих параметров были рассчитаны температурные поля, формирующиеся в толще «бабаковских» песчаников спустя 20, 50, 80 и 100 сут. после начала откачки (рис. 4). Их анализ показывает, что даже в наиболее гидродинамически нагруженной точке пласта (возле эксплуатационной скважины) понижение уровня подземных вод не превысит несколько метров, а температура воды в конце периода отбора не опустится ниже $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Учитывая, что средняя мощность разрабатываемого термоводоносного горизонта составляет 20 м, эксплуатационные запасы термальных вод в количестве $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ можно считать обеспеченными. При этом производительность теплоэнергетического модуля будет изменяться от $1,5 \text{ ГДж/час}$ в начале до $0,5 \text{ ГДж/час}$ в завершении откачки воды. Общее ко-

личество извлеченной за этот период (100 сут.) тепловой энергии будет равно $2,1 \text{ ТДж}$, что составит 75 % тепла заключенного в сжигаемом угле.

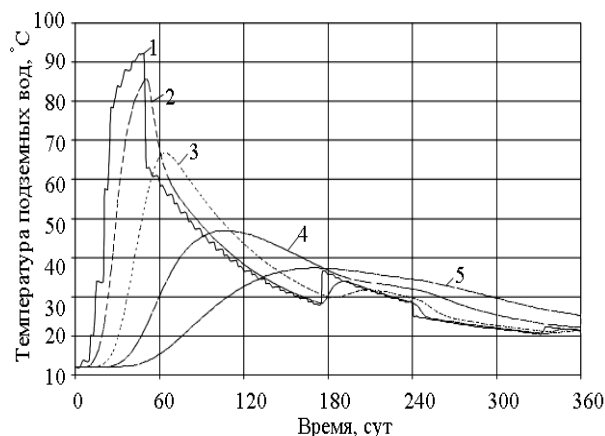


Рисунок 3 – Изменение температуры подземных вод насыщающих покрывающие породы сжигаемого угольного пласта: 1, 2, 3, 4, 5 – соответственно возле реакционного канала и на расстоянии 25, 50, 75 и 100 м от него

Необходимо учитывать, что приведенные расчеты соответствуют обработке способом ПСУ одной полосы угольного пласта длиной 25 м, количество которых в пределах затопленного шахтного поля может достигать десятков и даже сотен. Отсутствие взаимного влияния тепловых аномалий, формирующихся в покрывающих породах подземных генераторов на расстоянии 5–10 м друг от друга [5], позволит производить одновременное сжигание нескольких полос угольного массива и отбор термальных вод на всех разрабатываемых участках.

Синхронная работа пяти генераторов повысит производительность теплоэнергетического модуля до $7,5 \text{ ГДж/час}$ и полностью покроет расходы тепла, необходимые для отопления и горячего водоснабжения жилого микрорайона численностью 3000 человек в климатических условиях Западного Донбасса, величина которых изменяется от 7 до 5 ГДж/час [9].

Кроме того, в процессе сжигания угля, помимо термальных вод, потребитель будет получать горючий газ, пригодный для аккумулирования в пластах-коллекторах затопленной шахты.

Технико-экономическая оценка эффективности работы теплоэнергетического модуля может быть произведена на основании рыночных критериев и показателей, определенных путем экономико-математического моделирования в работе [10].

Согласно полученным коэффициентам, в данных горно-геологических и технологических условиях эксплуатации (глубина залегания водоносного пласта не превышает 0,5 км), рассчитанная теплопроизводительность модуля ($> 5 \text{ ГДж/час}$) возместит первичные расходы на его создание и обеспечит получение прибыли согласно стандарту дисконтной ставки.

Добываемое при разработке техногенного гидротермального месторождения тепло удовлетворяет мировым нормативам эффективного использования геотермальной энергии.

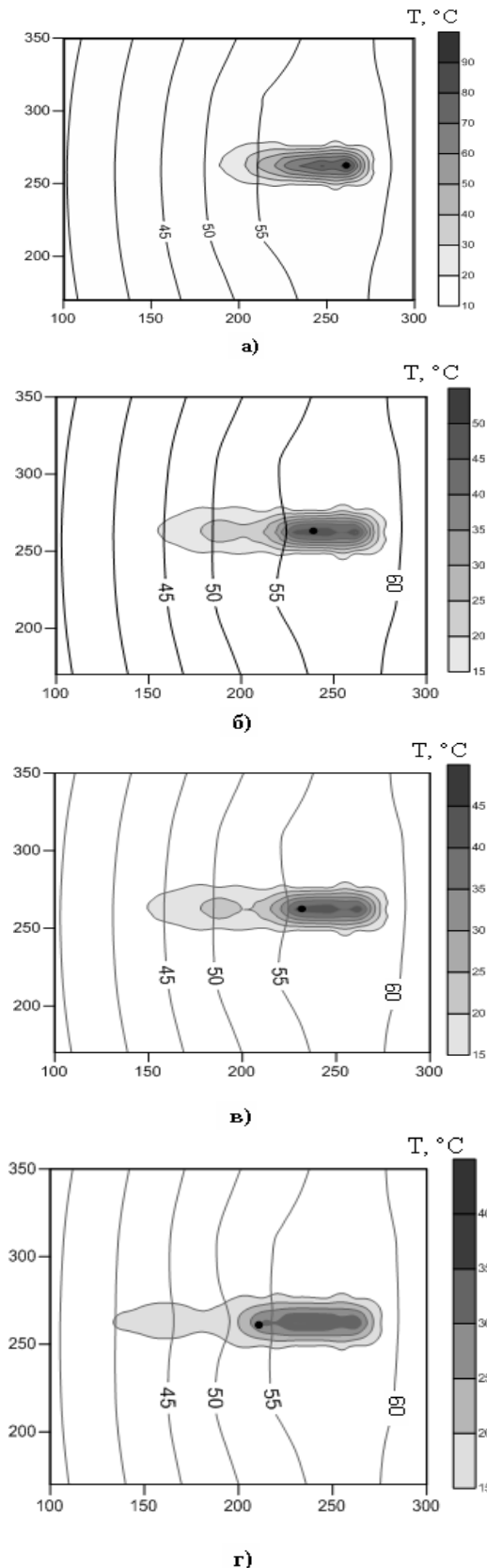


Рисунок – 4 Распределение уровня подземных вод (изолинии) и их температуры (оттенки серого цвета) в водоносном горизонте при сжигании угольного пласта: а), б), в), г) – соответственно спустя 20, 50, 80 и 100 суток после начала откачки нагретых вод

Точками показаны эксплуатационные скважины

ВЫВОДЫ. Физико-химические и гидродинамические процессы, протекающие в породах кровли при сжигании угольного пласта, приводят к формированию техногенного геотермального месторождения, к оценке запасов и разработке которого требуется специальный подход. Для обеспечения наиболее полного отбора накапливающейся в водоносных пластах тепловой энергии откачку нагретых вод следует производить в соответствии с перемещением их температурных максимумов комбинированной гидравлического и гидродинамического методов в горно-геологических условиях поля шахты «Ольховая–Западная» Донецкого бассейна обоснованы запасы термальных вод в количестве $100 \text{ м}^3/\text{сут}$, образующиеся при отработке способом ПСУ некондиционного угольного пласта h_{10}^1 и позволяющие производить коммунально-промышленное теплоснабжение инженерных сооружений на протяжении ста дней. Добытое количество тепловой энергии покрывает расходы тепла, необходимые для отопления и горячего водоснабжения жилого микрорайона численностью 3000 человек и обеспечит работу теплоэнергетического модуля на современном финансово-экономическом уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермилов С. Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 года: проблемные вопросы содержания и реализации [Электронный ресурс] // Зеркало недели. – 2006. – № 20. – Режим доступа к журналу: http://zn.ua/ECONOMICS/energeticheskaya_strategiya_ukrainy_na_period_do_2030_goda_problemye_voprosy_soderzhaniya_i_realiza-46810.html. – Название с экрана.
2. Жолудев С.В. Расчет теплового режима газогенератора при подземной газификации углей // Вісник Дніпропетровського університету. Серія геологія, географія. – 2003. – Вип. 5, № 7. – С. 11–20.
3. Крейнин Е.В. Нетрадиционные термические методы добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье. – М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2004. – 302 с.
4. 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.
5. Моделирование гидрогеотермических полей при подземном сжигании угольных пластов / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Вісник національно університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. Технічні науки. – 2013. – Вип. 1 (61). – С. 178–185.
6. Тишков В.В. Особенности формирования техногенной проницаемости в кровле угольного пласта при подземной газификации угля // Научный вестник НГУ. – 2012. – № 1. – С. 23–28.
7. S.R. Lindblom, V.E. Smith. Rocky Mountain 1 Underground Coal Gasification Test Hanna, Wyoming Groundwater Evaluation. Final Report June 10, 1988–

June 30, 1993. Work Performed Under Contract No.: DE-FG21-88MC25038.

8. Фролов Н.М. Геотермические методы исследований в гидрогеологии. – М.: Недра, 1979. – 289с. Термогидродинамическая оценка параметров системы подземного аккумулирования тепловой энергии / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Геотехническая механика: Межведомственный сборник на-

учных трудов Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск 2012. – Вып. 104. – С. 110–119.

10. Інкін О.В. Обґрунтування ефективності зберігання енергоносіїв у водоносних пластах Західного Донбасу // Збірник наукових праць НГУ. – 2011. – № 36, т. 1. – С. 200–208.

THERMAL MODULE EFFICIENCY ESTIMATION ON THE BASIS OF RESOURCE POTENTIAL OF A FLOODED MINE

I. Sadovenko, O. Inkin, D. Piliugin

National mining university

prosp. Karl Marx, 19, Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine. E-mail: inkin@ua.fm

The driven forces forming man-made geothermal deposits in a flooded mine as a result of underground combustion of low-grade coal seams are studied. The technologically important aspects and specific features of thermal and hydrodynamic conditions around the generator during underground combustion are specified and analysed. The phase stages and dynamics in zones of gas and thermal impacts near the face fire are described. The heat balance has been estimated for the conditions of accumulation and extraction of ground waters as the heat transfer agent sealing the underground heat power module. The exploitation reserves of heat energy accumulated in aquifers have been assessed using the «ModFlow 2009.1» numerical modelling software for geotechnical conditions of the mine «Ol'hoва-Zahidna» in the Donetsk coal basin. Exploitation of these reserves was established to enable heating spaces and hot water supplying for the municipal sector and ensure profitable performance of the heat thermal module in according to modern environmental standards.

Key words: underground incineration of coal, thermal energy, groundwater.

REFERENCES

1. Ermilov, S. (2006), «Power strategy of Ukraine on a period 2030 to: problem questions of maintenance and realization», *Mirror of week*, no. 20, available at: <http://zn.ua/ECONOMICS/energeticheskaya-strategiya-ukrainy-na-period-do-2030-goda-problemnye-voprosy-soderzhaniya-i-realiza-46810.html>. [Title from the screen].

2. Gholydev, S.V. (2003), «Calculation of the thermal mode of gazogene during underground gasification of coals», *Transactions of Dnipropetrovsk University. Series Geology, Geography*, iss. 5, no.7, pp. 11–20.

3. Kreinin, E.V. (2004), *Netraditsionnye termicheskie metody dobychi trudnoizvlekaemykh topliv: ugol, uglevodorodnoe syr'ye* [Unconventional thermal methods of booty difficult extractive fuel: coal, hydrocarbon raw material], Gazprom, Moscow, Russia.

4. Sadovenko, I.O. Rydakov, D.V., Inkin, O.V. (2012), «Numeral research of features of the thermal field round the underground gazogene», *Collected works of National Mining University*, no. 39. pp. 11–20.

5. Sadovenko, I.O., Inkin, O.V. (2013), «Design hydrogeothermal fields at underground incineration of coal beds», *Transactions of National University of Water Economy. Collected works: Engineering sciences*, iss. 1(61), pp. 178–185.

6. Tihkov, V.V. (2012), «Features of forming of technogenic permeability in the roof of coal bed during underground gasification of coal», *Collected works of National Mining University*, no.1, pp. 23–28.

7. Lindblom, S.R., Smith, V.E. (1993), Rocky Mountain 1 Underground Coal Gasification Test Hanna, Wyoming Groundwater Evaluation. Final Report June 10, 1988- June 30, 1993. Work Performed Under Contract No.: DE-FG21-88MC25038.

8. Frolov, N.M. (1979), *Geotermicheskie metody issledovaniy v gidrogeologii* [Geothermal methods of researches are in the geohydrology] Nedra, Moscow, Russia.

9. Sadovenko, I.O., Inkin, O.V. (2012), «Thermohydrodynamic estimation of parameters of the system of underground accumulation of thermal energy», *Geotechnical mechanics: Interdepartmental collection of scientific works of N.S. Poliakov Institute geotechnical mechanics of the National Academy of Science of Ukraine*, Dnipropetrovsk, Ukraine, iss. 104, pp. 101–110.

10. Inkin, O.V. (2011), «A ground of efficiency of storage of power mediums is in the aquiferous layers of Western Donbas», *Collected works of National Mining University*, no. 36, vol. 1, pp. 200–208.

Стаття надійшла 20.04.2013.