

# ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ЗАПАДНОГО ДОНБАССА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГАЗОХРАНИЛИЩ В ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТАХ

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

## Evaluation of the suitability of the geological structures of the Western Donbass to create aquifer storage facilities

I. A. Sadovenko, A. V. Inkin, Yu. V. Khriplivets

The current economic and energetic situation in the coal mining regions of Ukraine along with the need to solve problems of importing and development of their own natural gas fields determines the need for establishment of the suitability and search of aquifer geological structures for the accumulation of seasonal reserves of gaseous hydrocarbons. Based on the analysis of regional and local geological and hydro-geodynamic conditions authors set criteria for assessing the possible injection of hydrocarbon gas in the flooded rocks. With the help of these criteria, regionalization of Western Donbass was performed and Leventsovsky geological structure was selected, which has Permian-Triassic aquifer in an embedded section. Dedicated manifold is represented by a greenish-gray, quartz-feldspar coarse grained sandstones with interbedded highly kaolinized sands and relatively homogeneous in physical and mechanical properties, mineralogical and granulometric composition. Water contained therein is characterized by high mineralization value, high rigidity and total unsuitability for irrigation, domestic and industrial purposes. Interpretation of the data, gained on the investigated area of experimental filtration works, carried out by its appropriate hydrogeological and technological schematic, analytical calculations and graphic-analytical method showed that the filter coefficients and piezoconductivity of the aquifer vary accordingly within the limits 1,51–3,66 m/day and 4,5–9,1 \* 10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/day. The calculated values of filtration parameters allow us to consider this as a promising water bearing manifold gas storage facility; they were used in the calculations to determine its capacity characteristics, according to which the working volume of the intended storage will be 150 million m<sup>3</sup> and will partially smooth out seasonal fluctuations in gas consumption in the south-eastern part of Ukraine.

**Keywords:** water bearing gas storage, hydrocarbon gas, reservoir, the filtration properties.

Сложившаяся экономическая и энергетическая ситуация в угледобывающих регионах Украины наряду с потребностью решения проблем импортирования и разработки собственных месторождений природного газа предопределяет необходимость установления пригодности и поиска водоносных геологических структур для аккумуляции сезонных запасов газообразных углеводородов. На основе анализа геолого-структурных и гидрогеодинамических условий определены региональные и локальные критерии оценки возможности закачки углеводородного газа в обводненные породы. С их помощью выполнено районирование Западного Донбасса и выбрана Левенцовская геологическая структура, в разрезе которой заключен пермско-триасовый водоносный горизонт. Выделенный коллектор представлен зеленовато-серыми, кварц-полевошпатовыми крупнозернистыми песчаниками с прослоями сильно каолинизированных песков и сравнительно однороден по физико-механическим свойствам, минералогическому и гранулометрическому составу. Содержащийся в нем воды характеризуются повышенным значе-

нием минерализации, высокой жесткостью и совершенно непригодны для орошения, хозяйственно-бытовых и технических целей. Интерпретация данных, выполненных на исследуемом участке опытно-фильтрационных работ, осуществленная на основе его адекватной гидрогеологической и технологической схематизации, аналитических расчетов и графоаналитического метода, показала, что коэффициенты фильтрации и пьезопроводности водоносного горизонта изменяются соответственно в пределах 1,51–3,66 м/сут и 4,5–9,1·10<sup>6</sup> м<sup>2</sup>/сут. Полученные расчетные значения фильтрационных параметров позволяют рассматривать данный коллектор как перспективное водоносное газохранилище; они использовались в расчетах по определению его емкостных характеристик, согласно которым рабочий объем предполагаемого хранилища составит 150 млн м<sup>3</sup> и позволит частично сглаживать сезонную неравномерность газопотребления в юго-восточной части Украины.

**Ключевые слова:** водоносное газохранилище; углеводородный газ; пласт-коллектор; фильтрационные свойства.

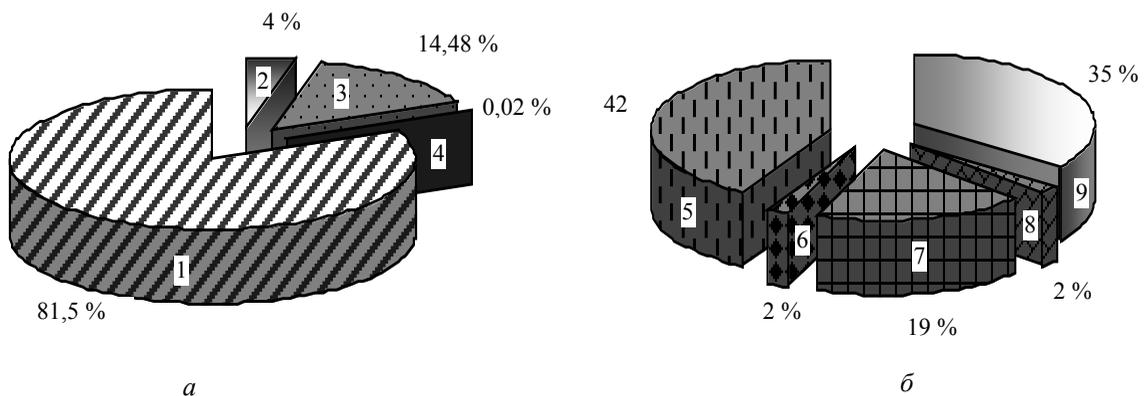
**В** Украине для обеспечения увеличивающегося спроса на тепловую энергию наряду с необходимостью решения проблем импортирования и разработки собственных месторождений природного газа довольно остро стоит вопрос синхронизации сезонной неравномерности его использования и поиска резервных аккумулирующих резервуаров. Предприятие «Укртрансгаз» для покрытия колебаний газопотребления эксплуатирует 13 подземных хранилищ газа (ПХГ), активный объем которых достигает 32 млрд м<sup>3</sup>. При этом на долю Южноукраинского и Донецкого комплекса ПХГ, которые осуществляют снабжение мощных горнодобывающих и перерабатывающих центров, расположенных на юго-востоке страны (Днепропетровск, Донецк, Кривой рог и т. д.), приходится менее 8 % общих запасов (около 2,5 млрд м<sup>3</sup>) [1]. Почти 70 % государственного резерва природного газа сосредоточено в Западноукраинском комплексе, обеспечивающем надежность его транзита через территорию Украины и регулирование неритмичности этого потока. Эти хранилища расположены в районе участков магистральных газопроводов «Союз», «Прогресс» и «Уренгой – Помары – Ужгород», транспортировка газа из которых в восточные регионы нерентабельна. Недостаточный объем собственных и невозможность получения ресурса других хранилищ стали причиной установления Министерством энергетики и угольной промышленности лимита для некоторых крупных городов в размере 1–2,5 млн м<sup>3</sup> газа в сутки в периоды его пикового спроса (январь – февраль). Данные ограничения вызвали значительную недостачу природного газа для отопления помещений на промышленных предприятиях, в бюджетных учреждениях и организациях. Кроме того, на отдельных произ-

водственных объектах происходило плановое и аварийное прекращение газоснабжения.

Хранение объема газообразных углеводородов (100–300 млн м<sup>3</sup>), способного сгладить сезонную неравномерность их потребления на юго-востоке Украины, возможно только в резервуарах, созданных в отложениях горных пород, так как вместимость наземных газогельдеров не превышает 500 тыс. м<sup>3</sup> [2]. Данные хранилища широко распространены во многих странах и эксплуатируются в США (около 400 хранилищ общим объемом 115 млрд м<sup>3</sup>), России (25 хранилищ – 66 млрд м<sup>3</sup>), Германии (40 хранилищ – 20 млрд м<sup>3</sup>), Франции (16 хранилищ – 12,7 млрд м<sup>3</sup>) и других государствах. Всего в мире действует более 600 подземных хранилищ различных типов совокупной активной емкостью порядка 340 млрд м<sup>3</sup>, что соответствует 10,8 % общемирового потребления газа (рис. 1). Анализ их работы показал, что средние удельные затраты на прирост 1 тыс. м<sup>3</sup> активного объема газа в водоносных породах составляют 50 долл. США, в то время как создание наземных резервуаров эквивалентного объема требует в 7–10 раз больше капитальных вложений. Кроме того, хранилища в водоносных структурах характеризуются высокой герметичностью, благодаря чему они могут использоваться для хранения парниковых газов, например CO<sub>2</sub>. Такие типы природных резервуаров, применяемых в мировой практике для хранения газа, как соляные полости и истощенные газо-нефтяные залежи, не могут рассматриваться как альтернатива ввиду ограниченности их распространения на территории промышленных центров Украины.

#### Формулировка целей статьи

Сложившаяся экономическая и энергетическая ситуация в угледобывающих регионах Ук-



**Рисунок 1. Распределение подземных хранилищ газа по типам (а) и их активных объемов по регионам (б) / Figure 1 | Distribution of underground gas storage by types and their active volumes by regions. 4 – хранилища в истощённых газо-нефтяных место-**

рождениях, соляных кавернах, водоносных горизонтов и отработанных шахтах; 5–9 – их ёмкость в Восточной Европе, Азии, Западной Европе, на Ближнем Востоке и американских континентах соответственно.

раины предопределяет необходимость установления критериев пригодности и поиска водоносных геологических структур для аккумуляции газообразных углеводородов в объеме, достаточном для сглаживания сезонных аномалий их потребления. Для выделенных пластов-коллекторов, с учетом необходимости прогнозов технологических режимов их эксплуатации, должна быть произведена оценка фильтрационных и физико-механических свойств.

#### Материал и результаты исследований

Закачка газа в обводнённые породы связана с нарушением их естественного режима и зависит как от региональных, так и от локальных геолого-структурных и гидрогеодинамических условий. В региональном плане наиболее благоприятными для хранения газа являются платформенные области, краевые прогибы, межгорные и предгорные впадины, в вертикальном разрезе осадочного чехла которых происходит закономерное изменение фильтрационных параметров и минерализации водоносных горизонтов. На этих территориях можно выделить три основные гидродинамические зоны, отличающиеся интенсивностью течения подземных вод [3, 4]: *верхнюю* (активного водообмена и возобновления), полностью исключающую накопление природных газов; *среднюю* (замедленного водообмена), в которую закачка газа возможна лишь на отдельных участках с регионально выдержанным водоупором; *нижнюю* (застойного водообмена), наиболее подходящую для аккумуляции газа вследствие высокой изоляции и минерализации подземных вод.

Отличительной особенностью последней зоны, подчеркивающей эффективность её использования для создания газохранилищ, является значительная глубина залегания, сопровождающаяся высокими напорами и защищенностью от поверхностного воздействия водоносных горизонтов.

К числу локальных факторов, от которых зависит пригодность водоносных пород для хранения газов, прежде всего относятся:

- ёмкостные свойства, определяемые пористостью, мощностью, площадью распространения и упругими показателями вмещающих пород;
- фильтрационные характеристики и гидродинамический напор водоносных горизонтов, влияющие на приёмистость скважин и ореол распространения закачиваемых газов;
- изолированность используемого коллектора, зависящая от избыточного давления в выше- и нижележащих водоносных пластах, а также проницаемости разделяющих отложений;
- совместимость углеводородных газов с горными породами и подземными водами, неа-

декватный учет которой может привести к кольматации призабойной зоны скважины;

– наличие перспективных для разработки полезных ископаемых.

С помощью предложенных факторов представляется возможным производить геотехнологическую и экологическую оценку пригодности коллекторов для аккумуляции газообразных углеводородов, а также прогнозировать параметры эксплуатации водоносных газохранилищ. Так, в пределах Западного Донбасса и прилегающих к нему участков можно выделить три района:

1) зона сочленения Днепровско-Донецкой впадины и Украинского кристаллического массива;

2) район структур, граничащих с открытым Донбассом (площадь развития среднего карбона);

3) юго-восточная часть Днепровско-Донецкой впадины (геологические структуры, расположенные севернее Михайловского сброса).

Южной границей первого района является окончание распространения нижнекаменноугольных отложений, северной – Михайловский сброс. Песчаники этого района (преимущественно Павлоградско-Петропавловского) характеризуются низкими фильтрационными и ёмкостными свойствами, а отложения нижнего карбона – промышленной угленосностью и разработкой угольных пластов шахтным способом. Кроме того, на данной территории в резервном фонде угольной промышленности находится около десятка шахтных полей. Приведенные данные исключают возможность закачки природных газов в продуктивную толщу этого района.

Второму выделенному району, граничащему на востоке с открытым Донбассом, а на западе – с Левенцовским поднятием, в отличие от первого присущи значительные глубины залегания нижнекаменноугольных отложений (более 2000 м), обладающих ещё более незначительными коллекторскими свойствами. Эти породы перекрыты толщей среднего карбона, в разрезе которого сосредоточены крупные (до 180 м) пачки песчаников и 34 угольных пласта промышленной значимости с мощностью от 0,6 до 2,35 м. Сверху залегают мезокайнозойские отложения плотных пластичных и сланцевых глин (до 150–170 м), являющихся региональным водоупором. Рассматриваемая территория охвачена геологоразведочными работами и является резервом Павлоградского угольного месторождения, вследствие чего не может быть использована для хранения природных газов.

Третий район имеет следующие границы: на севере – Мечебилово-Кобзевская антиклинальная зона; на юге – Михайловский сброс; на за-

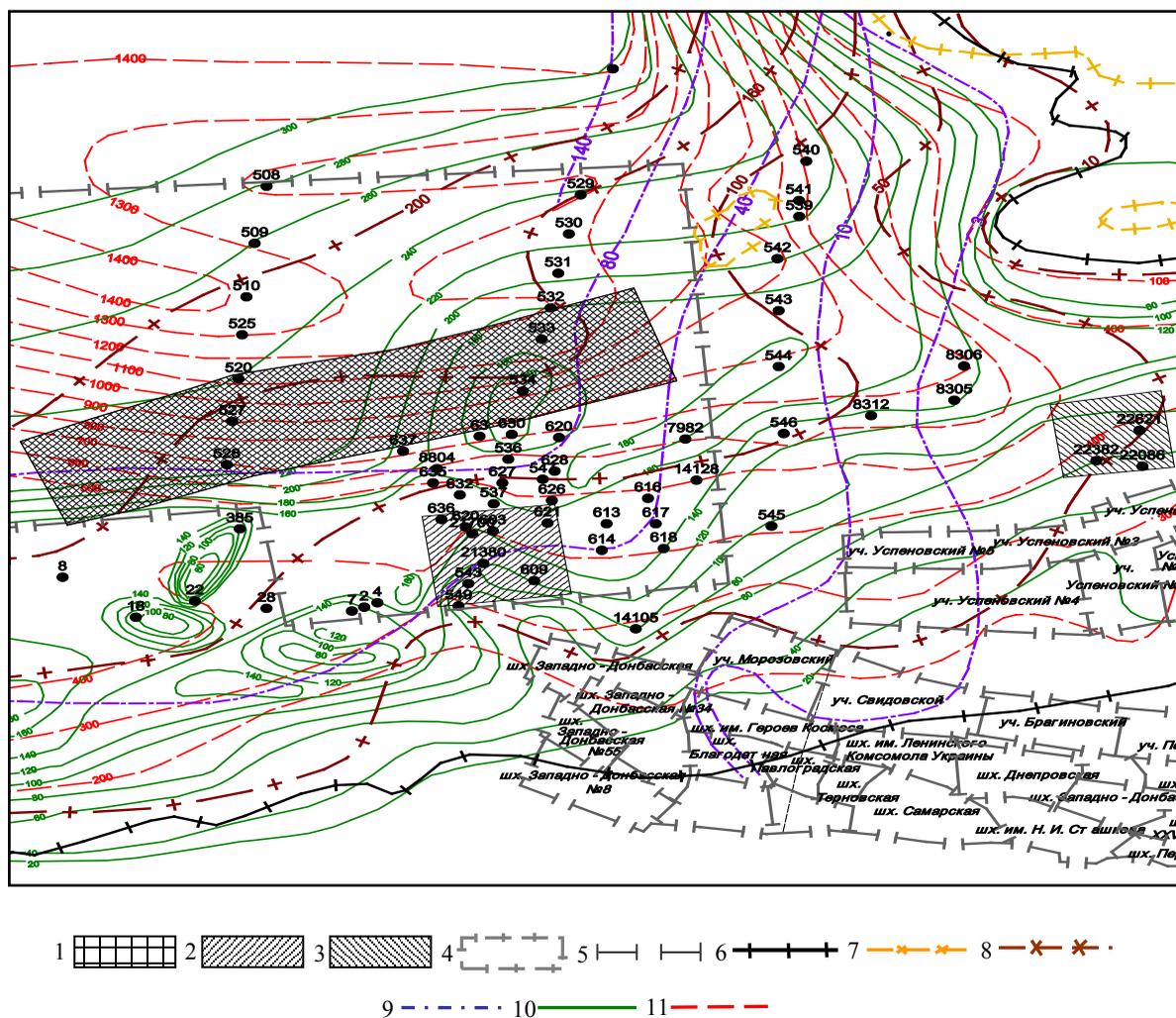


Рисунок 2. Карта районирования территории Западного Донбасса по условиям хранения углеводородного газа в пермско-триасовых отложениях (М 1:500 000) / Figure 2 | The map of regionalization of Western Donbass by the hydrocarbon gas storage conditions in the Permian-Triassic sediments (scale 1: 500 000). 1-3 – соответственно Северо-Орельский,

Левенцовский и Первомайский участки, 4-7 – границы шахтных полей, перспективных площадей, юрских и пермских отложений соответственно; 8-9 – минерализация водоносных горизонтов среднего карбона и пермо-триаса; 10-11 – изолинии мощности и глубин залегания кровли пермо-триасовых отложений.

пада – р. Ворскла; на востоке – граница распространения пресных вод в триасовом водоносном комплексе (долгота горы Лозовая). В пределах его территории отложения башкирского и московского яруса приурочены к зоне весьма затруднительного водообмена и содержат мощные (до 100–200 м) пачки песчаников, рекомендуемые для аккумуляции газа. Наличие газовых месторождений в структурах этого района подтверждает высокую степень его гидродинамической закрытости. При этом верхним региональным водопором являются среднеюрские глины, нижним – глинистые отложения низов башкирского яруса.

Учитывая перспективность третьего района в его пределах, Павлоградская геологоразведочная экспедиция провела комплексные поисковые работы [5]. Первоначально в качестве коллекто-

ров изучались песчаники башкирского и московского ярусов, однако результаты опытных работ показали более высокие фильтрационные свойства песчаников пермо-триаса, что позволило сориентировать на них дальнейшие исследования. Выполненные буровые, каротажные, опытно-фильтрационные и лабораторные работы подтвердили перспективность этого пласта и позволили выделить три потенциальные площади (рис. 2). Дальнейшие исследования (структурно-поисковое бурение и опробования) показали, что среди отмеченных участков наиболее значительным ёмкостным ресурсом обладает Левенцовская площадь. Активная пористость  $n_a$  пермско-триасовых отложений на этой территории колеблется от 9,6 до 29,0 %, а проницаемость  $k$  – от  $10^{-15}$  до  $2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ , в то время как значения

этих параметров на Северо-Орельской и Первомайской площади уменьшаются:  $n_a = 8,28-28,3\%$ ,  $\kappa = 10^{-15}-10^{-12} \text{ м}^2$  и  $n_a = 5\%$ ,  $\kappa = 10^{-15}-10^{-13} \text{ м}^2$  соответственно. Кроме того, в пределах Левенцовской структуры породы пермо-триаса обладают наибольшей эффективной мощностью (120 м) и наименьшей глубиной залегания (300–680 м).

Перспективный коллектор приурочен к континентальным терригенным отложениям и представлен зеленовато-серыми, кварц-полевошпатовыми крупнозернистыми песчаниками, переслаиваемыми с прослоями темно-серых, сильно каолинизированных песков. Породы пласта сравнительно однородны по физико-механическим свойствам и гранулометрическому составу, как в площадном отношении, так и в вертикальном разрезе, что обуславливает относительное постоянство их фильтрационных свойств. Незначительная литологическая изменчивость пород, связанная с уменьшением объема пор под влиянием эпигенетических процессов и увеличения давления, происходит постепенно, поэтому выделение каких-либо границ внутри пласта не представляется возможным. Коллектор характеризуется повышенным и относительно выдержанным значением водообильности, а приуроченный к нему водоносный горизонт – смешанным типом циркуляции (трещинно-поровым), гидродинамическим напором, изменяющимся от 180 до 270 м и упругим режимом фильтрации, обусловленным слабопроницаемыми свойствами вышележащих пород, исключая перетекание подземных вод. Водовмещающие породы имеют осадочное происхождение и слабометаморфизированы в пределах всей Левенцовской структуры.

Непосредственная кровля выделенного коллектора характеризуется наличием мощной (110–200 м) толщи нижнеюрских, голубовато-серых, монтмориллонитовых глин следующего гранулометрического состава: глинистых частиц – 49,7–72,1 %, пылеватых – 13,5–40,6 % и песчаных – 0,5–12,6 %. Удельный и объемный вес пород изменяется в пределах 2660–2740 кг/м<sup>3</sup> и 1950–2010 кг/м<sup>3</sup> соответственно, что свидетельствует об их сильном уплотнении. Естественная влажность глин  $W$  колеблется от 13,41 до 22,11 % при нижнем пределе пластичности  $W_p$  от 24,95 до 28,84 %. Сравнение влажности с пределом пластичности позволяет установить, что нижнеюрские глины находятся в твердой консистенции ( $W < W_p$ ). Кроме того, наличие минералов монтмориллонита и дисперсионный состав частиц обуславливают высокую экранирующую способность пород и коэффициент проницаемости, приблизительно равный  $10^{-17} \text{ м}^2$ .

На юрских глинах с угловым несогласием залегают отложения нижнего и верхнего мела. При этом нижнемеловые породы общей мощностью до 60 м сложены серыми разномеловыми кварцевыми песчаниками, чередующимися с прослоями глин, верхнемеловые – кварцево-глауконитовыми мелко- и среднезернистыми песками сенманского яруса и белым писчим мелом турона. Породы мезозоя трансгрессивно перекрываются палеогеновыми отложениями, представленными темно-серыми мелко- и тонкозернистыми песками бучакской свиты, а также голубовато-серыми мергелистыми глинами. Выше пород палеогена залегают четвертичные отложения мощностью до 50 м, состоящие из лессовидных суглинков, красно-бурых глин и аллювиальных песков.

Почва пермо-триасового коллектора приурочена к отложениям среднего карбона, представленного толщей разномеловых алевролитовых песчаников трещиноватого строения и обладающих меньшей, в сравнении с вышележающими породами, проницаемостью. Незначительная изменчивость литологического состава, выветрелости и трещиноватости песчаников общей мощностью от 34 до 112 м обусловила сравнительную однородность их фильтрационных свойств. Водоносный горизонт этих отложений залегают под угольным пластом  $h_{10}$  и обладает гидродинамическим напором, изменяющимся от 240 м в зоне выхода под мезозой до 1800 м при погружении. Глубина пьезометрических уровней в зависимости от рельефа местности колеблется в пределах 77–120 м.

С целью адекватного определения водоносности, коллекторских свойств, гидродинамических параметров и состава подземных вод выделенного пермско-триасового водоносного горизонта Левенцовской площади в соответствии с методикой [6] были проведены опытно-фильтрационные работы. На исследуемой территории выполнены четыре одиночных и одна кустовая откачка, одно пробное и опытное нагнетание. Месторасположение и форма куста скважин определялись целевым назначением и продолжительностью опытов, а также гидрогеологическими и граничными условиями участка.

Откачки проводились эрлифтом на базе компрессора УКП-80, а нагнетания осуществлялись с помощью центробежного шахтного насоса ЦНС-180. Их продолжительность согласно рекомендациям [7, 8] обуславливалась необходимостью достижения установившегося или квазистационарного режима в наблюдательных скважинах, соответствующего получению представительного (прямолинейного) участка на графиках временного  $S = f(\lg(t))$  и площадного  $S = f(\lg(r))$  прослеживания понижения уровня

подземных вод. Также с целью повышения достоверности определяемых гидрогеологических параметров использовались данные о восстановлении уровня после прекращения откачки и построенные на их основе графики  $S^* = f(\lg(t))$  и  $S^* = f(\lg(r))$ .

Опытнo-фильтрaционные работы производились по стандартной методике с учащенными замерами уровней подземных вод в начале откачек и нагнетаний, ввиду неустановившегося режима фильтрации в эти периоды. Измерение дебитов скважин осуществлялось объемным способом одновременно с фиксированием динамических уровней лазерной рулеткой. Интервал замеров в течение 2 ч после начала откачки составлял 5–10 мин, последующие 6 ч – 30 мин и далее до её окончания – 60 мин. Наблюдения за восстановлением уровня проводились по следующему графику: первые 15 мин через 2 мин, на протяжении 1 ч – через 5 мин и затем – через 1 ч. По данным опытных работ установлены изменения дебитов скважин (7,5–17,5 дм<sup>3</sup>/с) при понижениях 4,2–10,8 м и их приёмистости (7,1–11,35 дм<sup>3</sup>/с) при избыточном напоре 48,3–52,9 м.

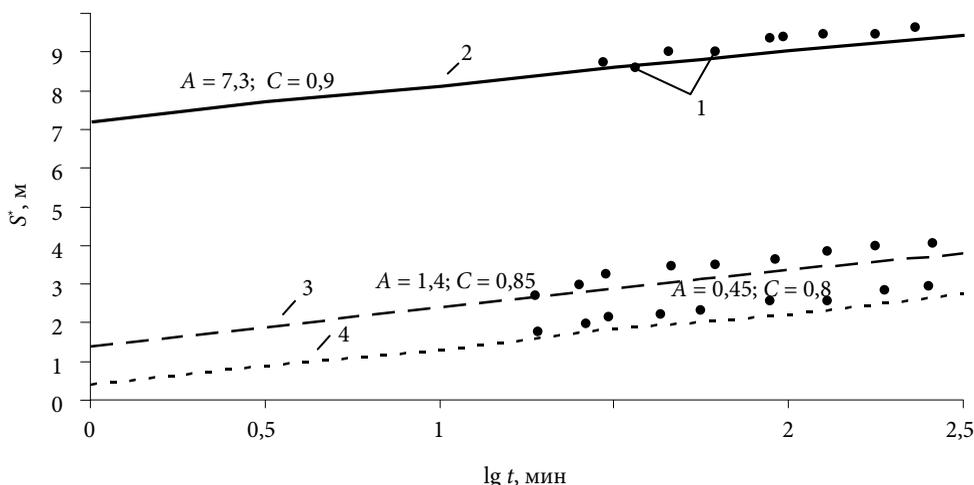
В процессе откачки пробы подземных вод шли на полный химический анализ, согласно которому воды пермо-триаса относятся к хлоридно-натриевым, обладают минерализацией от 38,0 до 62,7 г/дм<sup>3</sup> и содержат различные химические элементы в следующих концентрациях: Cu – 1,5–3,5 мг/дм<sup>3</sup>, Zn – 0,6–5,0 мг/дм<sup>3</sup>, U – до  $6 \cdot 10^{-7}$  г/дм<sup>3</sup>, Fe – до 20 мг/дм<sup>3</sup>, I – до 1,8 мг/дм<sup>3</sup> и Br – до 20,5 мг/дм<sup>3</sup>. С увеличением глубины залегания пласта минерализация и количество ионов (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> и Na<sup>+</sup>) в подземных водах повышаются. Физические свойства вод характеризуются как неудовлетворительные, ввиду горько-соленого и очень жесткого состава, а также неблагоприятных индустриально-технических качеств (воды вспенивающиеся  $F = 32118$ – $50242$ , корродирующие  $K_k = 44,14$ – $110,88$  и обладают большим количеством твердого котельного камня  $K_n = 0,61$ – $1,95$ ). Приведенные физико-химические показатели подземных вод пермо-триаса показывают, что они совершенно непригодны для орошения, хозяйственно-бытовых и технических целей.

Для выполнения качественной интерпретации данных, полученных в ходе выполнения опытнo-фильтрaционных работ, нужны адекватная схематизация области фильтрации и обоснованный выбор расчетной схемы. Необходимость упрощения реальных условий исследуемого участка вызвана с одной стороны сложностью и неоднородностью его геологического строения, а с другой – незначительным влиянием ряда естественных параметров на конечный результат изысканий. При этом типизация ре-

жима подземных вод при проведении опытных откачек и нагнетаний возможна по совокупностям гидрогеологических и технологических факторов. Так, исследуемый для оценки возможности аккумуляции газообразных углеводородов пермско-триасовый водоносный горизонт по профильной структуре комплекса может быть представлен как однослойный пласт, ввиду относительной однородности его физико-механических свойств в вертикальном разрезе. По режиму подземных вод выделенный коллектор является напорным, по характеру ёмкостных свойств – гетерогенным (трещинно-поровым) и по степени фильтрационной анизотропии – изотропным. С точки зрения гидродинамических границ пласт может рассматриваться как неограниченный, поскольку в южном направлении он имеет весьма широкое распространение, а в северном – в 30 км от Левенцовского участка – перекрывается вышележащим бучакским горизонтом, характеризующимся высокой водопроницаемостью и являющимся его гидравлическим продолжением. По наличию дополнительного фильтрационного питания и взаимодействию с другими пластами водоносный горизонт принимается изолированным, что подтверждается данными пробных откачек, согласно которым при отборе воды из толщи пермо-триаса не были отмечены изменения уровней в горизонтах свит  $S_2^3$  и  $P_{2bc}$ . Ввиду незначительного угла падения пласта в расчетной схеме он считается горизонтальным, а его кровля и подошва из-за низких фильтрационных характеристик – непроницаемой.

Технологические факторы типизации опытнo-фильтрaционных работ, оказывающие меньшее влияние на режим подземных вод, чем гидрогеологические, в основном определяют структуру фильтрационного потока а, следовательно, и качество обработки полученных данных. В рассматриваемом случае буровые скважины по степени вскрытия водоносного пласта считаются несовершенными, обладающими точечным источником (длина фильтра значительно меньше мощности пласта), а по пространственному расположению – строго вертикальными. Принимается, что все скважины работают в синхронном режиме, с одновременным включением и выключением.

Предварительные одиночные откачки проводились в песчаниках пермо-триаса (скв. № 22783 и 22784) и карбона (скв. № 22825 и 22902) с построением графиков восстановления уровня после их остановки. Опытная кустовая откачка из пермо-триаса происходила в течение 4 сут на скв. № 22817 с регистрацией уровней в скв. № 21729, 22783 и получением графиков вре-



**Рисунок 3. Графики полулогарифмической зависимости повышения уровня воды при кустовой откачке / Figure 3 | Charts of semilogarithmic dependency of increase of the water level at bush pumping. 1-4 – соответственно фактические за-**

**меры и их прямолинейная аппроксимация в центральной № 22817 (статистический уровень 59,67 м) и наблюдательных № 21729 (статистический уровень 59,13 м), 22783 (статистический уровень 58,97 м) скважинах.**

менного, площадного и комбинированного прослеживания (рис. 3). Анализ графиков показывает уменьшение понижения уровня подземных вод с увеличением расстояния от центральной (опытной) скважины.

Для обоснованной расчетной схемы количественная интерпретация проведенных откачек возможна несколькими методами: отношений, разностей, графоаналитическим, эталонной кривой, интегральных преобразований Лапласа, Карсона и В. Б. Георгиевского. При этом наиболее надежные результаты даёт графоаналитиче-

ский метод, который для сравнения рекомендуется применять вместе с каким-либо другим, сопровождая контрольными расчетами. Его сущность заключается в логарифмической аппроксимации формулы, описывающей понижения уровня подземных вод в конкретных условиях. В нашем случае (неограниченный однородный полностью изолированный пласт) для установления понижения подходит формула Тейса и её преобразование к уравнению прямой линии временного прослеживания в полулогарифмических координатах [9]:

**Фильтрационные параметры водоносных пластов Левенцовской структуры, определенные по результатам обработки данных опытно-фильтрационных работ**

Номер скважины	Геологический индекс	Технологические данные			Опытные откачки		Опытное нагнетание		Расчетные значения	
		Одиночная откачка (Q, дм³/с) / (S <sub>0</sub> , м)	Кустовая откачка (Q, дм³/с) / (S <sub>0,1,2,3</sub> , м)	Нагнетание (Q <sup>+</sup> , дм³/с) / (S <sub>0</sub> <sup>+</sup> , м)	K, м/сут (един. куст.)	a, м²/сут (един. куст.)	K, м/сут	a, м²/сут	K, м/сут	a, м²/сут
22817	P – T	–	13,3 / 9,3	18,6 / 57,3	– / 1,51	–	3,26	–	–	–
22783	P – T	12,8 / 9,36	– / 4,61	– / 6,62	2,74 / 2,3	7,2 · 10 <sup>6</sup> / –	3,30	–	3,3	6 · 10 <sup>6</sup>
22784	P – T	9,6 / 6,43	– / 2,14	– / 3,69	3,66 / 2,15	9,1 · 10 <sup>6</sup> / 4,7 · 10 <sup>6</sup>	3,16	4,9 · 10 <sup>6</sup>	–	–
21729	P – T	–	– / 5,7	– / 7,8	– / 2,02	–	3,34	4,5 · 10 <sup>6</sup>	–	–
22825	C <sub>2</sub> <sup>3</sup>	8,3 / 65,46	–	–	0,23 / –	–	–	–	–	–
22902	C <sub>2</sub> <sup>3</sup>	9,3 / 66,7	–	–	0,37 / –	–	–	–	0,3	–

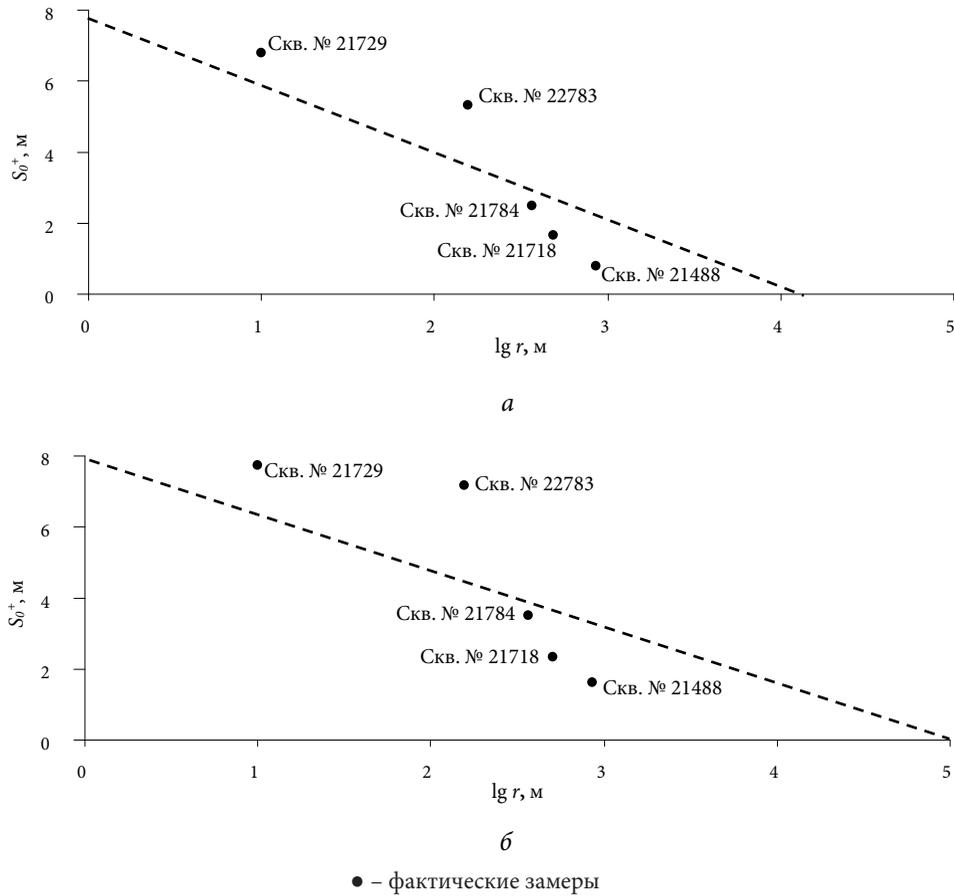


Рисунок 4. Графики площадного прослеживания повышения уровня воды в скважинах в процессе промышленного нагнетания спустя 5 (а) и 25 (б) сут

от его начала / Figure 4 | Areal tracking of rising water levels in wells at the process of industrial discharge after 5 and 25 days from the beginning.

$$S = \frac{0,183Q}{T} (\lg t + \lg \frac{2,25a}{r^2}), S = Clgt + A,$$

$$C = \frac{Q}{4\pi} \ln 10 \approx \frac{0,183Q}{T}, A = Clg \frac{4a}{e^\gamma r^2} \approx Clg \frac{2,25a}{r^2},$$

$$T = \frac{0,183Q}{C}, a = 10^{\frac{A/C + \lg \frac{r^2}{2,25}}{2,25}}, \quad (1)$$

где  $S$  – понижение подземных вод;  $Q$  – дебит скважины;  $T$  – водопроводимость ( $T = Km$ );  $K$  – коэффициент фильтрации;  $m$  – мощность водоносного пласта;  $a$  – коэффициент пьезопроводности;  $r$  – горизонтальное расстояние от опытной до наблюдательной скважины;  $\gamma$  – постоянная Эйлера;  $C$  – угол наклона прямой;  $A$  – величина, которую отсекает прямая на оси ординат.

При выполнении расчетов по формуле (1) расстояния между скважинами принимались согласно рис. 3. Анализ результатов расчетов, приведенный в таблице, показывает хорошую сходимость и площадную однородность коэффициентов водопроводимости и пьезопровод-

ности, определенных по данным пробной и кустовой откачки.

С целью уточнения фильтрационных параметров пермско-триасового коллектора и приближения условий проведения опытно-фильтрационных работ к реальной задаче (закачке газообразных углеводородов) на территории Левенцовской площади было проведено промышленное нагнетание в скв. 22817 с регистрацией изменения уровня подземных вод в скв. № 21729, 22783, 22784 и 21433. По результатам испытаний построен график площадного прослеживания (рис. 4).

Обработка данных нагнетаний производилась графоаналитическим методом путем аппроксимации формулы (1) к уравнению прямой линии площадного прослеживания

$$S = -Clgr + A,$$

$$C = \frac{Q}{2\pi T} \ln 10 \approx \frac{0,366Q}{T}, A = \frac{C}{2} \lg \frac{4a}{e^\gamma} \approx \frac{C}{2} \lg(2,25a),$$

$$T = \frac{0,366Q}{C}, a = 10^{\frac{2A/C - \lg(2,25t)}{2,25}}. \quad (2)$$

Результаты расчетов по формуле (2), приведенные в таблице, показывают отличия фильтрационных параметров, определенных по данным откачек и нагнетаний, связанные с механическими свойствами и физико-химической когматацией пород. В условиях артезианского пласта потенциальная энергия упруго сжатой системы «вода – минеральный скелет» при закачке и отборе имеет противоположную направленность, обуславливающую необходимость дополнительного напора на дофильтрационное сжатие нагнетаемой воды и разность рассчитываемых коэффициентов фильтрации.

Полученные расчетные значения фильтрационных параметров пласта-коллектора использовались в работе [10] для определения ёмкостных характеристик Левенцовской площади. Согласно проведенным расчетам рабочий объем предполагаемого водоносного хранилища составит 150 млн м<sup>3</sup>, что позволит частично сглаживать сезонную неравномерность газопотребления в юго-восточной части Украины, не ухудшая при этом качество подземных вод в ближайших водозаборах.

#### Выводы

С помощью определенных критериев оценки возможности закачки углеводородного газа в обводнённые породы установлено, что на территории Западного Донбасса наиболее перспективным ёмкостным ресурсом обладает Левенцовская структура. Приуроченный к ней пермско-триасовый водоносный горизонт сравнительно однороден по физико-механическим свойствам и гранулометрическому составу, а также характеризуется повышенным и относительно выдержанным значением минерализации подземных вод. Выполненная обработка результатов опытно-фильтрационных работ позволила определить коэффициенты фильтрации и пьезопроводности перспективного коллектора, величина которых изменяется в пределах 1,51–3,66 м/сут и  $4,5\text{--}9,1 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут соответственно. Расчетные значения фильтрационных параметров были установлены путем статистической обработки полученных данных ( $K = 3,3$  м/сут и  $a = 6 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут) и использовались для нахождения объема предполагаемого газохранилища.

Принято к публикации 13.02.2016

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин В. П., Кокорина М. Т. Планирование энергообеспечения регионов Украины на основе возобновляемых источников энергии // Вісник КрНУ ім. Михайла

- Остроградського. 2013. № 3 (80). С. 60–65.  
 2. Басниев К. С. Энциклопедия газовой промышленности. М.: Твант, 1994. 884 с.  
 3. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.  
 4. Новиков В. П., Грязнов О. Н. Защищенность питьевых подземных вод от загрязнения в пределах восточного склона Уральской гидрогеологической складчатой области // Изв. УГГУ. 2012. № 27–28. С. 45–50.  
 5. Городец О. А. Отчет о поисках и оценке коллекторов для захоронения минерализованных шахтных вод Западного Донбасса. Павлоград: ГРЭ ПГО «Донбассгеология», 1985. 219 с.  
 6. Антонов В. В. Поиски и разведка подземных вод. СПб.: С.-Петербург. госуд. горн. ин-т, 2006. 94 с.  
 7. Шестаков В. М., Невечеря И. К. Теория и методы интерпретации опытных откачек. М.: Изд-во МГУ, 1998. 158 с.  
 8. Семьячков А. И., Коновалов И. В. Гидрогеологические проблемы освоения Екатеринбургского метрополитена // Изв. УГГУ. 2007. № 22. С. 68–75.  
 9. Синдаловский Л. Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2006. 769 с.  
 10. Садовенко И. А., Рудаков Д. В., Инкин А. В. Газо-гидродинамическая оценка параметров хранения газа в водоносном горизонте // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. трудов. 2010. Вып. 91. С. 77–84.

#### REFERENCES

1. Kalinchik V. P., Kokorina M. T. 2013, Planirovanie energobespecheniya regionov Ukraini na osnove vobnovlyayemikh istochnikov energii [Planning for energy supply of regions of Ukraine based on renewable energy sources]. *Visnik Kremenchutskogo natsional'nogo universitetu imeni Mikhaïla Ostrogradskogo – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University*, no. 3, pp. 60–65.  
 2. Basniev K. S. 1994, *Entsiklopediya gazovoy promyshlennosti* [Encyclopedia of the gas industry]. 884 p.  
 3. Gol'dberg V. M., Gazda S. 1984, *Gidrogeologicheskie osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [Hydro-geological bases of protection of groundwater against pollution]. 262 p.  
 4. Novikov V. P., Gryaznov O. N. 2012, *Zashchishchennost' pit'evykh podzemnykh vod ot zagryazneniya v predelakh vostochnogo sklona Ural'skoy gidrogeologicheskoy skladchatoy oblasti* [Protectability of drinking groundwater from pollution within the limits of the eastern slope of the Ural hydrogeological folded area]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta – News of the Ural State Mining University*, no. 27–28, pp. 45–50.  
 5. Gorodets O. A. 1985, *Otchet o poiskakh i otsenke kollektorov dlya zahoroneniya mineralizovannykh shakhtnykh vod Zapadnogo Donbassa* [The report on search and evaluation of reservoirs for the disposal of mineralized mine waters of Western Donbass], *JSC "Donbassgeologiya"*. 219 p.  
 6. Antonov V. V. 2006, *Poiski i razvedka podzemnykh vod* [Prospecting and exploration of groundwater], Saint-Petersburg Mining Institute. 94 p.  
 7. Shestakov V. M., Nevecherya I. K. 1998, *Teoriya i metody interpretatsii opitnykh otkachek* [Theory and methods of interpretation of pumping tests], Moscow State Univer-

sity. 158 p.

8. Semyachkov A. I., Konovalov I. V. 2007, *Gidrogeologicheskiye problemy osvoeniya Ekaterinburgskogo metropolitena* [Hydrogeological problems of development of Yekaterinburg Metro]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta – News of the Ural State Mining University*, no. 22, pp. 68-75.

9. Sindalovskii L. N. 2006, *Spravochnik analiticheskikh reshenii dlya interpretatsii opytно-fil'tratsionnykh oprobo-*

*vanii* [Handbook of analytical solutions for the interpretation of experimental and filtration tests]. p. 769.

10. Sadovenko I. A., Rudakov D. V., Inkin A. V. 2010, *Gazogidrodinamicheskaya otsenka parametrov khraneniya gaza v vodonosnom gorizonte* [Gas-hydrodynamic evaluation of parameters of gas storage in the aquifer]. *Geotekhnicheskaya mekhanika: mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Geotechnical mechanics: Interdepartmental collection of scientific papers], no. 91, pp. 77-84.

**Иван Александрович Садовенко**,  
доктор технических наук, профессор  
**Александр Викторович Инкин**,  
кандидат технических наук, доцент,  
inkin@ua.fm

**Юлия Владимировна Хрипливец**,  
аспирант

Национальный горный университет,  
Украина, Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19

**Ivan Aleksandrovich Sadovenko**,  
Dr., Professor

**Aleksandr Viktorovich Inkin**,  
PhD, Associate Professor,  
inkin@ua.fm

**Yulija Vladimirovna Khriplivets**,  
postgraduate researcher

National Mining University,  
Dnepropetrovsk, Ukraine