

УДК 622.691.2

А. Инкин, д-р техн. наук, доц.,  
проф. каф. гидрогеологии и инженерной геологии, E-mail: inkin@ua.fm  
Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет"  
пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, 49600, Украина

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ВОДОНОСНЫХ ПОРОД ПРИ ХРАНЕНИИ ГАЗООБРАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)

Сложившаяся экономическая и энергетическая ситуация в промышленных 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 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 и гранулометрическому составу. Содержащиеся в нем воды характеризуются повышенным значением минерализации, высокой жесткостью и совершенно непригодны для хозяйственно-бытовых и технических целей. Интерпретация данных выполненных на исследуемом участке опытно-фильтрационных работ, осуществленная на основе адекватной гидрогеологической и технологической схематизации, аналитических расчетов и графоаналитического метода показала, что коэффициенты фильтрации и пьезопроводности водоносного горизонта изменяются соответственно в пределах  $1,51 - 3,66 \text{ м/сут}$  и  $4,5 - 9,1 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Полученные расчетные значения фильтрационных параметров позволяют рассматривать данный коллектор как перспективное водоносное газохранилище и могут быть использованы при определении его емкостных характеристик.

Для оценки степени влияния аккумулируемого газа на фильтрационные свойства выделенного пласта-коллектора и герметичность предполагаемого хранилища был проведен комплекс специальных лабораторных экспериментов, основанный на воспроизведении длительного контакта газообразных углеводородов под давлением с образцами водовмещающих пород и периодическом определении их проницаемости в стабилметре TriSCAN. Проведенными исследованиями установлено значительное (15 – 20%) увеличение абсолютной проницаемости водоносного пласта и подстилающих его пород при хранении в нем углеводородных газов. Показано, что вызванные агрессивным воздействием газа деструктивные изменения скелета пород происходят в приповерхностной зоне мощностью несколько миллиметров и не создают угрозу разгерметизации хранилища за проектный период его работы.

**Ключевые слова:** углеводородный газ, хранилище, водоносный горизонт, фильтрационные свойства.

**Постановка проблемы.** В Украине для обеспечения увеличивающегося спроса на тепловую энергию, наряду с необходимостью решения экономических проблем импортирования и разработки отечественных месторождений газообразных углеводородов, довольно остро стоит вопрос синхронизации сезонной неравномерности их использования и необходимости поиска резервных емкостей для аккумуляции энергоносителей. На данный момент 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 комплексов ПХГ, которые осуществляют снабжение мощных горнодобывающих и перерабатывающих центров, расположенных на юго-востоке страны (Днепр, Кривой рог, Донецк и т.д.), приходится менее 8 % общих запасов (около 2,5 млрд м<sup>3</sup>) (Садовенко и др., 2012). 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 газового лимита для некоторых крупных городов юго-восточной части Украины в периоды пикового спроса (январь – февраль). Данные ограничения вызвали значительный дефицит газа на промышленных предприятиях, в бюджетных учреждениях и организациях. Кроме того, на отдельных производственных объектах происходило плановое и аварийное прекращение газоснабжения.

Хранение объема газообразных углеводородов (100–300 млн м<sup>3</sup>), способного сгладить сезонную нерав-

номерность 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> (Басниев, 1994). 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 в 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 (Бачурина, 2002), что средние удельные затраты на прирост 1 тыс. м<sup>3</sup> активного объема газа в водоносных породах составляют 50 долларов 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>. Применяемые в мировой практике для хранения газа такие типы природных резервуаров, как соляные полости и истощенные газо-нефтяные залежи, не могут рассматриваться как альтернатива ввиду ограниченности их распространения на территории промышленных центров Украины.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах (Инкин и др., 2014; Садовенко и др., 2010) уже было показано, что в качестве емкостного ресурса способного вмещать запасы природного газа в количестве 150 млн м<sup>3</sup>, может быть использовано поровое пространство пермско-триасового водоносного горизонта, расположенного в пределах Левенцовской площади (1930 км<sup>2</sup>) Западного Донбасса (рис. 2). Мощность выделенного коллектора изменяется от 113 до 127 м при глубине залегания кровли от 350 до 580 м. Воды горизонта характеризуются высокой минерализацией (33 – 65 г/л)

и не пригодны для любого вида водоснабжения. Перспективный пласт представлен зеленовато-серыми, кварц-полевошпатовыми крупнозернистыми песчаниками, переслаивающимися с прослоями темно-серых, сильно каолинизированных глинистых 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 коллекторских свойств.

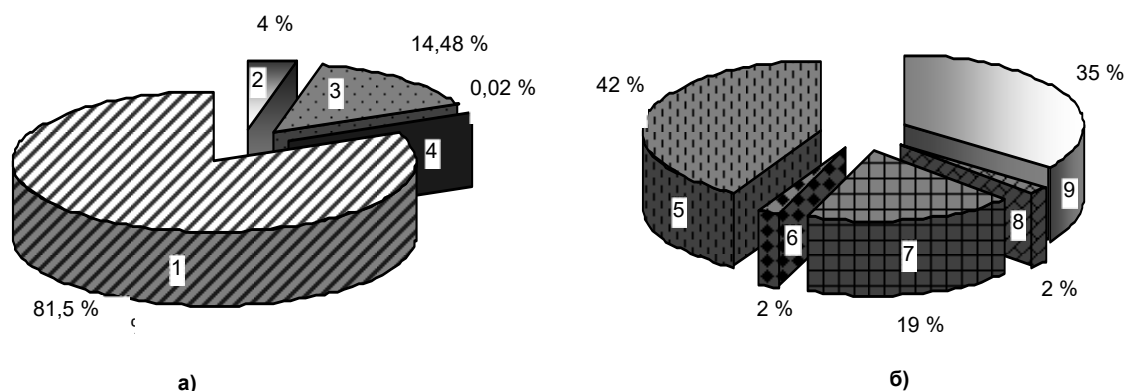


Рис. 1. Распределение подземных хранилищ газа по типам (а) и их активных объемов по регионам (б):

1 – 4 – соответственно хранилища в истощенных газонефтяных месторождениях, соляных кавернах, водоносных горизонтах и отработанных шахтах; 5 – 9 их емкость в Восточной Европе, Азии, Западной Европе, Ближнем Востоке и Американских континентах соответственно

**Выделение нерешенных частей проблемы и формулировка целей статьи.** Эксплуатация газохранилища в выделенном коллекторе будет сопровождаться периодической закачкой и отбором углеводородного газа, проникающего на довольно значительные расстояния и взаимодействующего с горными породами по пути движения. Этот процесс ведёт к изменению их порового пространства и значительному загрязнению геологической среды (Бухгалтер и др., 2002). Кроме того, агрессивное воздействие газа на вмещающие породы может вызвать деструкцию их скелета, что создаст угрозу увеличения проницаемости и потери герметичности предполагаемого резервуара. В связи с этим, целью данной работы является анализ горно-геологических условий Левенцовской структуры и проведение лабораторных исследований по оценке степени влияния аккумулируемого газа на фильтрационные свойства пород-коллекторов для обеспечения стабильной работы газохранилища.

**Основной материал исследований.** Перспективный пласт-коллектор приурочен к континентальным терригенным отложениям. 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 ( $W_p$ ) 24,95–28,84%. 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 обуславливает их высокую экранирующую способность пород и коэффициент проницаемости приблизительно равный  $10^{-17}$  м<sup>2</sup>.

На юрских глинах с угловым несогласием залегают отложения нижнего и верхнего мела. При этом нижнемеловые породы общей мощностью до 60 м сложены серыми разнозернистыми кварцевыми песчаниками, чередующимися с прослоями глин, верхнемеловые – кварцево-глауконитовыми мелко- и среднезернистыми песками сеноманского 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 разнозернистых 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 обусловило сравнительную однородность их фильтрационных свойств. Водоносный горизонт этих отложений залегает 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 (Антонов, 2006) были проведены опытно-фильтрационные работы. На исследуемой территории выполнено четыре одиночных и одна кустовая откачка, одно пробное и опытное

нагнетание. Месторасположение и форма куста скважин определялось 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 (Шестаков и Невечера, 1998), обуславливалась необходимостью до-

стижения 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  $S'=f(\lg(r))$ .

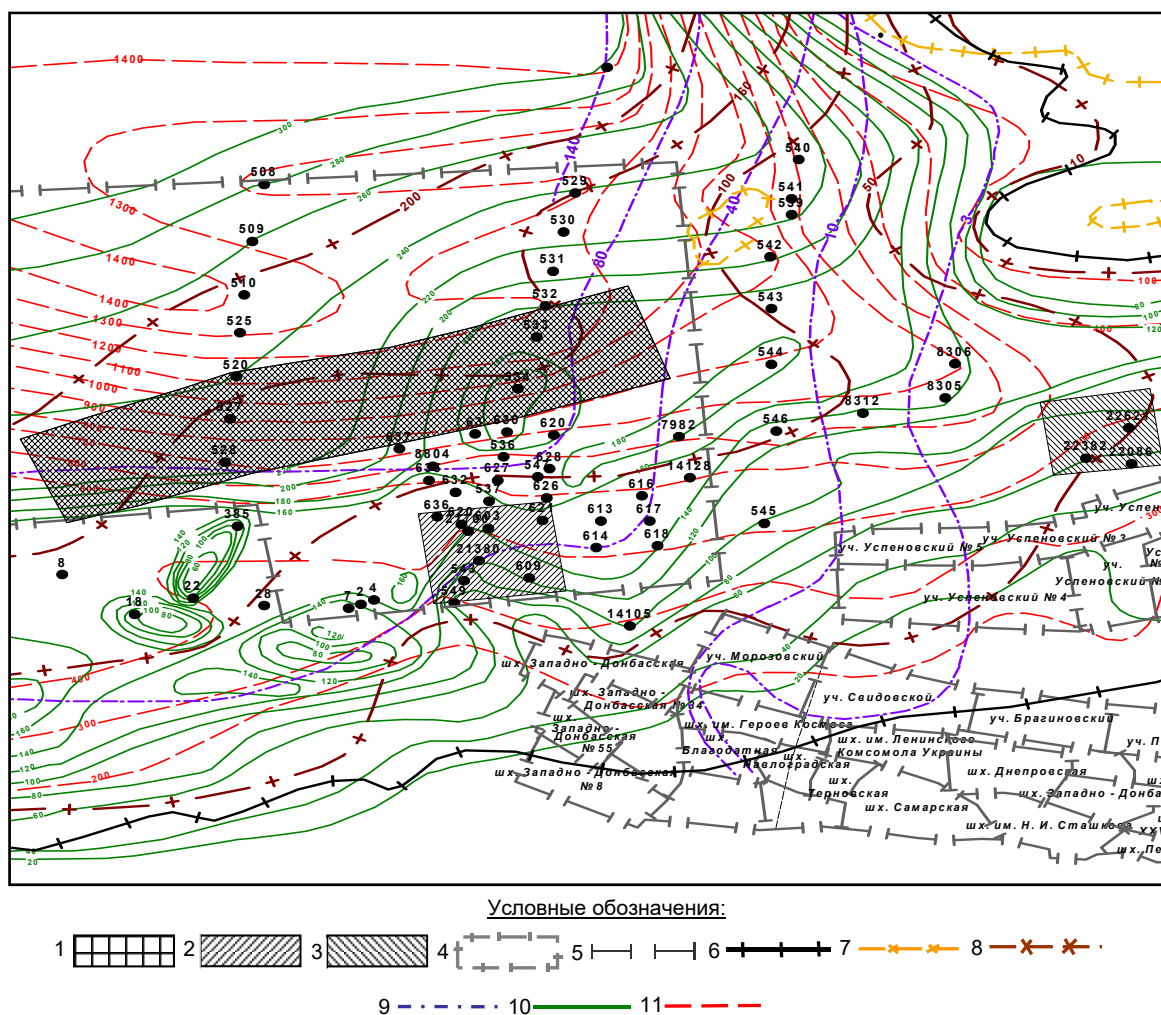


Рис. 2. Схема районирования территории Западного Донбасса по условиям хранения углеводородного газа в пермско-триасовых отложениях:

1–3 – соответственно Северо-Орельский, Левенцовский и Первомайский участок, 4–7 – границы шахтных полей, перспективных площадей, юрских и пермских отложений соответственно; 8–9 – минерализация водосносных горизонтов среднего карбона и пермо-триаса; 10–11 – изолинии мощности и глубин залегания кровли пермо-триасовых отложений

Проведения опытно-фильтрационных работ производилось по стандартной методике с учащенными замерами уровней подземных вод в начале откачек и нагнетаний, в виду неуставившегося режима фильтрации в эти периоды. Измерение дебитов скважин осуществлялось объемным способом одновременно с фиксированием динамических уровней лазерной рулеткой. Интервал замеров, в течение 2 часов после начала откачки, составлял 5 – 10 мин., последующие 6 часов – 30 мин. и далее до ее окончания – 60 мин. Наблюдения за восстановлением уровня проводились по следующему графику: первые 15 мин. через 2 мин., на протяжении 1 часа – через 5 мин. и затем – через 1 час. 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

приемистости (7,1–11,35 дм<sup>3</sup>/с) при избыточном напоре 48,352,9 м.

В процессе откачки пробы подземных вод отбирались 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 6·10<sup>-7</sup> 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 повышается. Физические свойства вод характеризуются как неудовлетворительные, в виду 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  $K_h = 0,61 - 1,95$ ). 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 опытно-фильтрационных работ нужна 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 режима 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, в виду относительной однородности его физико-механических свойств в вертикальном разрезе. По режиму подземных вод выделенный коллектор является напорным, по характеру емкостных 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 которых при отборе воды из толщи пермо-триаса не были отмечены изменения уровней в горизонтах свит  $S_2^3$  и  $P_{2bc}$ . В виду незначительного угла падения пласта, в расчетной схеме, он считается горизонтальным, а его кровля и подошва, из-за низких фильтрационных характеристик – непроницаемой.

Технологические факторы типизации опытно-фильтрационных 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 суток на скв. № 22817 с регистрацией уровней в скв. № 21729, 22783 и получением графиков временного, площадного и комбинированного прослеживания (рис. 3). Анализ графиков показывает уменьшение понижения уровня подземных вод с увеличением расстояния от центральной (опытной) скважины.

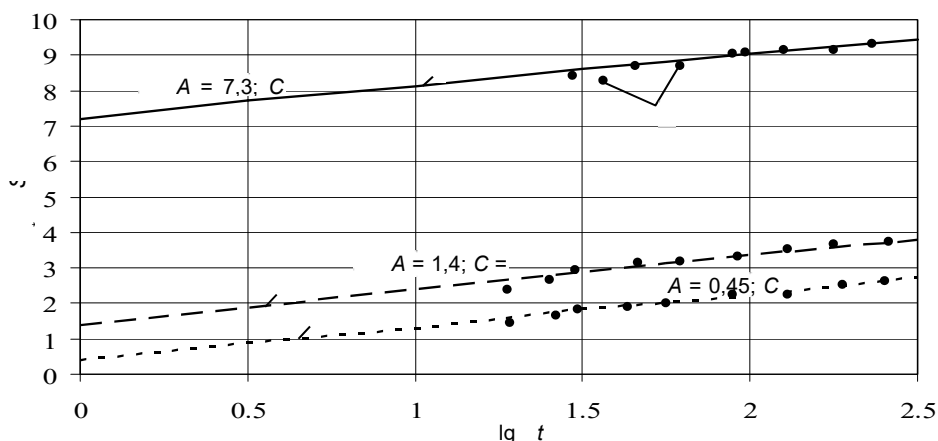


Рис. 3. Графики полулогарифмической зависимости повышения уровня воды при кустовой откачке:

1 – 4 соответственно фактические замеры и их прямолинейная аппроксимация в центральной № 22817 (стат. уровень 59,67 м) и наблюдательных № 21729 (стат. уровень 59,13 м), 22783 (стат. уровень 58,97 м) скважинах

Выполненная обработка результатов опытно-фильтрационных работ позволила определить коэффициенты фильтрации и пьезопроводности перспективного коллектора, величина которых изменяется в пределах  $1,51 - 3,66 \text{ м/сут}$  и  $4,5 - 9,1 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$  соответственно. При этом средние значения проницаемости горных пород равняются: крупнозернистых песчаников –  $3,2 - 4,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ ; глинистых песков –  $1,7 - 2,9 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$  и алевритовых песчаников (почва коллектора) –  $6,5 - 7,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ . Диапазон полученных значений объясняется их определением по данным откачек и нагнетаний и связан с механическими свойствами и физико-химической коллиматацией 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.

Отобранные в процессе проведения геологоразведочных работ пробы пород были использованы для лабораторных исследований. Размер и форма опытных образцов (длина – 76 мм, диаметр – 38 мм) принималась в соответствии с техническими требованиями прибора трехосного сжатия (стабилометра) TriSCAN фирмы VJTech (Великобритания), с помощью которого

производилось определение их проницаемости. Изготовленные образцы были помещены в экспериментальную установку (рис. 4), избыточное давление в которой поддерживалось периодическим нагнетанием сжиженного газа (пропано-бутановая смесь) из резервуара. Регистрация давления в сосуде осуществлялась с помощью манометра, при этом его величина на протяжении

всего эксперимента была равной давлению, которое соответствует упругости паров газовой смеси (0,3 МПа). Данный способ испытания образцов воспроизводил более жесткие, чем в реальности, условия соприкосновения углеводородов с породой из-за значительно большей контактирующей поверхности породы на единицу ее объема.

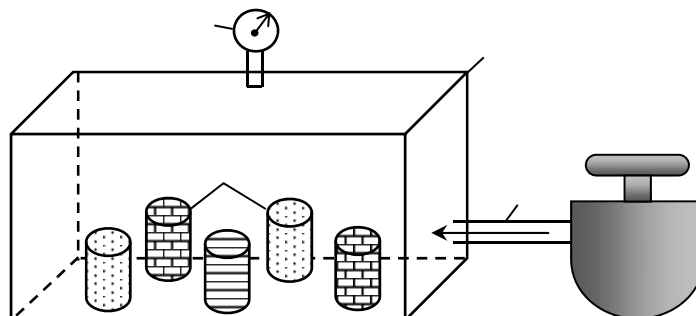


Рис. 4. Экспериментальная установка для оценки воздействия углеводородных газов на проницаемость горных пород: 1 – сосуд; 2 – образцы пород; 3 – резервуар с пропано-бутановой смесью; 4 – шланг; 5 – манометр

Перед помещением образцов в установку и через каждый месяц после этого проводилось определение их абсолютной проницаемости. Для этого извлеченные из сжиженного газа образцы по методу ASTM (Амикс и др., 1962) подвергались длительному экстрагированию толуолом до полного освобождения порового пространства и помещались в камеру стабилометра. Равностороннее обжатие образца (воссоздание горного давления) обеспечивалось при помощи нагнетания в камеру жидкости через контроллер, а покрытие образца эластичной оболочкой способствовало однородности возникающих деформаций. Подача дистиллированной воды под давлением в образец производилась с помощью другого контроллера. Регистрация объемов закачиваемой и вытесняемой жидкости, а также времени ее фильтрации позволяла фиксировать значения коэффициентов проницаемости в соответствии с программой исследований. Обработка результатов замеров и нахо-

ждение средних значений проницаемости производилось с помощью методов математической статистики. Такой режим испытаний поддерживался на всем протяжении эксперимента.

На рис. 5 приведены усредненные данные об изменении абсолютной проницаемости пород Левенцовской структуры в процессе их контакта с углеводородами. Анализ, построенных с помощью кубической сплайн-интерполяции, графиков показывает, что проницаемость большей части исследуемых групп образцов в течение семи месяцев испытаний (продолжительность хранения газа в межотопительный период) изменилась. В среднем к завершению эксперимента по всем типам исследуемых пород (крупнозернистые и алевролитовые песчаники, глинистые пески) проницаемость увеличилась на 15–20 %. Необходимо отметить, что хотя в целом по партии образцов определенного литологического типа существенного увеличения проницаемости не отмечалось, по отдельным образцам она возросла на 30–40 %.

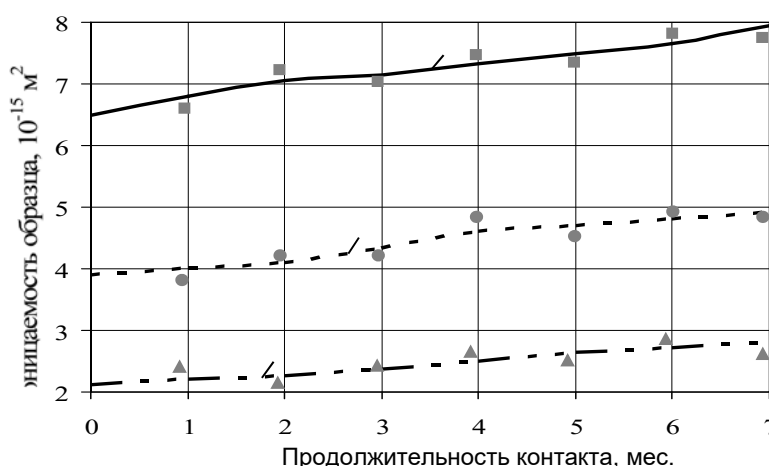


Рис. 5. Изменение абсолютной проницаемости образцов горных пород при контакте с углеводородным газом: 1 – глинистых песков; 2–3 – крупнозернистых и алевролитовых песчаников соответственно

Поскольку в период испытаний образцы горных пород, извлеченные из углеводородной среды, неоднократно подвергались экстрагированию, необходимо было оценить степень воздействия высоких температур паров толуола на скелет породы и точность проводимых экспериментов. Для этого дополнительно были изготовлены образцы, аналогичные хранившимся в сосуде с

избыточным давлением. После того как была определена их начальная проницаемость они дважды подверглись экстрагированию, причем длительность операции равнялась суммарной продолжительности нескольких экстрагирований, которым подверглись образцы, контактирующие с пропано-бутановой смесью. Полученные результаты показали, что проницаемость продолжительно

экстрагированных образцов практически не изменилась (не более 4%) и, следовательно, причиной увеличения проницаемости хранившихся в углеводородной среде образцов является ее агрессивное воздействие.

Для оценки проникновения углеводородного воздействия вглубь пород-коллекторов с боковых поверхностей образцов, хранившихся в сжиженном газе, по всему периметру механическим способом снимался равномерно тонкий слой породы, после чего определялась их абсолютная проницаемость. Снятие слоев с образцов проводилось до глубины 5 мм с интервалом в 1 мм. Результаты испытаний приведены на рис. 6, анализ которых показывает снижение проницаемости образцов по мере удаления слоев. Первоначальная проницаемость образцов достигается в зависимости от литологического типа пород в среднем после удаления 3–4-х миллиметрового слоя. Таким образом, обнаруженное ранее увеличение проницаемости образцов, контактирующих с углеводородными продуктами, вызвано деструктивными изменениями породы в приповерхностной зоне, мощность которой не превышает первых единиц миллиметров.

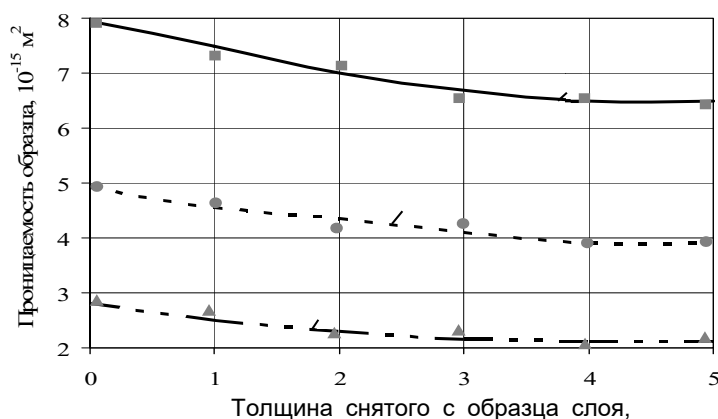


Рис. 6. Изменение абсолютной проницаемости образцов, хранившихся в сжиженном газе, при равномерном удалении породы с их поверхности. Обозначения см. рис. 5

Проведенные с целью установления влияния сберегаемого углеводородного газа на фильтрационные свойства пород лабораторные исследования в целом показали значительное (15–20%) повышение абсолютной проницаемости пласта-коллектора и подстилающих его пород. Данные изменения, с одной стороны, приведут к увеличению емкостного ресурса водоносного газохранилища, с другой – могут способствовать перетоку аккумулируемого газа в нижележащие породы. Однако если в процессе эксплуатации газохранилища деструктивные изменения пород будут происходить с той же скоростью (около 0,5 мм в месяц) как и во время эксперимента, то за проектный период его работы (50 лет) мощность формирующейся в почве коллектора зоны техногенной проницаемости не превысит 30 см, что не создаст угрозу разгерметизации хранилища.

#### Список использованных источников

1. Амикс, Д., Басс, Д., Уайтинг, Р. (1962). Физика нефтяного пласта. Москва: Гостоптехиздат.
2. Антонов, В.В. (2006). Поиски и разведка подземных вод. Санкт-Петербург: С.-Петерб. госуд. горн. ин-т.
3. Басниев, К.С. (1994). Энциклопедия газовой промышленности. Москва: Твент.
4. Бачурина, Н.М. (2002). Экономическая эффективность создания и эксплуатации подземных хранилищ газа. Автореф. дис...канд. экон. наук: 08.00.05. Москва.
5. Бухгалтер, Э.Б., Медиков, Е.В., Бухгалтер, Л.Б. (2002). Экология подземного хранения газа. Москва: МАИК "Наука/Интерпериодика".
6. Инкин, А.В., Деревягина, Н.И., Хрипливец, Ю.В. (2014). Перспективы создания водоносного газохранилища в горно-геологических условиях Левенцовской площади. Збірник наукових праць Національного гірничого ун-ту, 44, 22-27.

**Выводы.** Анализ горно-геологических условий Левенцовской площади показал наличие мощного пермско-триасового водоносного горизонта, представленного переслаивающимися слоями крупнозернистых песчаников и глинистых песков, способными аккумулировать значительные объемы (150 млн м³) природного газа. Кровля выделенного коллектора приурочена к нижнеюрским слабопроницаемым глинам, практически полностью исключающим возможность перетока газа в вышележащие породы, почва – к трещиноватым алевролитовым песчаникам. Выделенный 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 проницаемости перспективного коллектора, величина которых изменяется в пределах 1,51–3,66 м/сут и 4,5–9,1·10⁶ м²/сут соответственно.

7. Садовенко, И.А., Инкин, А.В., Рудаков, Д.В. (2012). Оценка потерь газа при его хранении в водоносных пластах Западного Донбасса. Науковий вісник Національного гірничого ун-ту, 6, 18-24.
8. Садовенко, И.А., Инкин, А.В., Рудаков, Д.В. (2010). Газогидродинамическая оценка параметров хранения газа в водоносном горизонте. Геотехническая механика: Межведомственный сборник научных трудов, 91, 77-84.
9. Шестаков, В.М., Невечеря, И.К. (1998). Теория и методы интерпретации опытных откачек. Москва: МГУ.

#### References

1. Amiks, D., Bass, D., Uaiting, R. (1962). Fizyka neftyanoho plasta. Moskva: Gostoptekhizdat. [in Russian]
2. Antonov, V.V. (2006). Poiski i razvedka podzemnykh vod. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Mining Institute. [in Russian]
3. Basniev, K.S. (1994). Entsiklopediya gazovoy promyshlennosti. Moskva: Tvant. [in Russian]
4. Bachurina, N.M. (2002). Economic efficiency of the creation and operation of underground gas storage facilities. Extended abstract of Candidate's thesis (Economy). Moscow. [in Russian]
5. Buhgalter, E.B., Medikov, E.V., Buhgalter, L.B. (2002). Ekologiya podzemnogo khraneniya gaza. Moskva: MAIK "Nauka/Interperiodika". [in Russian]
6. Inkin, A.V., Dereviagina, N.I., Khriplivets, Iu.V. (2014). Perspektivy stvoriannya vodonosnogo gazokhranilishcha v gorno-geologicheskikh usloviyakh Leventsovskoy ploshchadi. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universitetu, 44, 22-27. [in Ukrainian]
7. Sadovenko, I.A., Inkin, A.V., Rudakov, D.V. (2012). Otsenka poter gaza pri ego khranenni v vodonosnykh plastakh Zapadnogo Donbassa. Naukoviy visnyk Natsionalnogo hirnychoho universitetu, 6, 18-24. [in Ukrainian]
8. Sadovenko, I.A., Rudakov, D.V., Inkin, A.V. (2010). Gazogidrodinamicheskaya otsenka parametrov khraneniya gaza v vodonosnom gorizonte. Geotekhnicheskaya mekhanika: Mezhdromstvennyy sbornik naukovykh trudov, 91, 77-84. [in Ukrainian]
9. Shestakov, V.M., Nevecheria, I.K. (1998). Teoriya i metody interpretatsii opytnykh otkachek. Moskva: MGU. [in Russian]

Надійшла до редколегії 05.10.17

O. Inkin, Dr. Sci. (Techn.), Associate Professor, Professor,  
E-mail: inkin@ua.fm  
National Mining University  
19 Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49600, Ukraine

## EVALUATION OF WATER-BEARING STRATA COLLECTIVE PROPERTIES CHANGE AT THE STORAGE OF GASEOUS HYDROCARBONS

*The current economic and energy situation in industrial regions of Ukraine, along with need to address the problems of importing and developing its own natural gas deposits, predetermines the need to establish the suitability and search for aquiferous geological structures for accumulation of seasonal reserves of gaseous hydrocarbons. Based on the analysis of geological-structural and hydro-geodynamic conditions, West Donbass was divided into districts and Leventsovskaya geological structure was chosen, in a section of which the Permian-Triassic aquifer is located. Dedicated reservoir is represented by greenish-gray, quartz-feldspar coarse-grained sandstones with interlayers of strongly kaolinized sands and comparatively homogeneous in physico-mechanical properties and granulometric composition. The waters contained in it are characterized by an increased mineralization, high rigidity and are completely unsuitable for domestic and technical purposes. Interpretation of data from the experimental filtration works performed on a site, carried out on a basis of adequate hydrogeological and technological schematization, analytical calculations and grapho-analytical method, showed that the coefficients of filtration and piezoconductivity of an aquifer vary, respectively, from 1.51 to 3.66 m/day and 4.5 to 9.1·10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/day. The calculated values of filtration parameters allow considering this reservoir as promising water-bearing gas storage and can be used to determine its capacitive characteristics.*

*To assess the degree of influence of accumulated gas on filtration properties of the dedicated reservoir and the hermeticity of the assumed storage, a series of special laboratory experiments was conducted, based on a reproduction of a long-term contact of gaseous hydrocarbons with samples of water-bearing rocks under pressure and periodic determination of their permeability in a TriSCAN stability meter. The studies have established a significant (15-20%) increase in absolute permeability of an aquifer and underlying rocks when hydrocarbon gases are stored within. It is shown that the destructive changes of a rock matrix caused by aggressive gas impact occur in a near-surface zone with a thickness of several millimeters and will not create a threat of depressurization of the storage during a designed period of operation.*

*Keywords: hydrocarbon gas, storage, aquifer, filtration properties.*

О. Інкін, д-р техн. наук, доц., проф.  
E-mail: inkin@ua.fm  
Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет"  
пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49600, Україна

## ОЦІНКА ЗМІНИ КОЛЕКТОРСЬКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДОНОСНИХ ПОРІД ПРИ ЗБЕРІГАННІ ГАЗОПОДІБНИХ ВУГЛЕВОДНІВ

*Сучасна економічна і енергетична ситуація у промислових регіонах України, поряд з потребою вирішення проблем імпортування та розробки власних родовищ природного газу, зумовлює необхідність установаження придатності й пошуку водонасних геологічних структур для акумуляції сезонних запасів газоподібних вуглеводнів. На основі аналізу геолого-структурних і гідрогеодинамічних умов виконано районування Західного Донбасу й обрана Левенцовська геологічна структура, у розрізі якої знаходиться пермсько-тріасовий водонасний горизонт. Виділений колектор представлений зеленувато-сірими, кварц-польовошпатовими грубозернистими пісковиками з прошарками сильно каоїнізованих пісків і однорідний за фізико-механічними властивостями і гранулометричним складом. Його підземні води характеризуються підвищеним значенням мінералізації, високою жорсткістю і абсолютно непридатні для господарсько-побутових і технічних цілей. Інтерпретація даних виконаних на досліджуваній ділянці дослідно-фільтраційних робіт, здійснена на основі адекватної гідрогеологічної і технологічної схематизації, аналітичних розрахунків і графоаналітичного методу показала, що коефіцієнти фільтрації і п'єзопровідності водонасного горизонту змінюються відповідно в межах 1,51–3,66 м/доб і 4,5–9,1·10<sup>6</sup> м<sup>2</sup>/доб. Отримані розрахункові значення фільтраційних параметрів дозволяють розглядати даний колектор як перспективне водонасне газосховище і можуть бути використані при визначенні його ємнісних характеристик.*

*Для оцінки ступеня впливу вуглеводневого газу на фільтраційні властивості виділеного пласта-колектора і герметичність передбачуваного сховища було проведено комплекс спеціальних лабораторних експериментів, заснований на відтворенні тривалого контакту газоподібних вуглеводнів під тиском із зразками водонасних порід і періодичному визначенні їх проникності в стабілометрі TriSCAN. Проведеними дослідженнями встановлено значне (15–20 %) збільшення абсолютної проникності водонасного пласта і підстилаючих його порід при зберіганні в ньому вуглеводневих газів. Показано, що викликані агресивною дією газу деструктивні зміни скелета порід відбуваються у приповерхневій зоні потужністю кілька міліметрів і не створюють загрозу розгерметизації сховища за проектний період його роботи.*

*Ключові слова: вуглеводневий газ, сховище, водонасний горизонт, фільтраційні властивості.*