

РОЗДІЛ «ТЕПЛОТЕХНІКА. ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»

УДК 622.691.2

САДОВЕНКО И.А., д.т.н., профессор
ИНКИН А.В., к.т.н., доцент, докторант

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет”

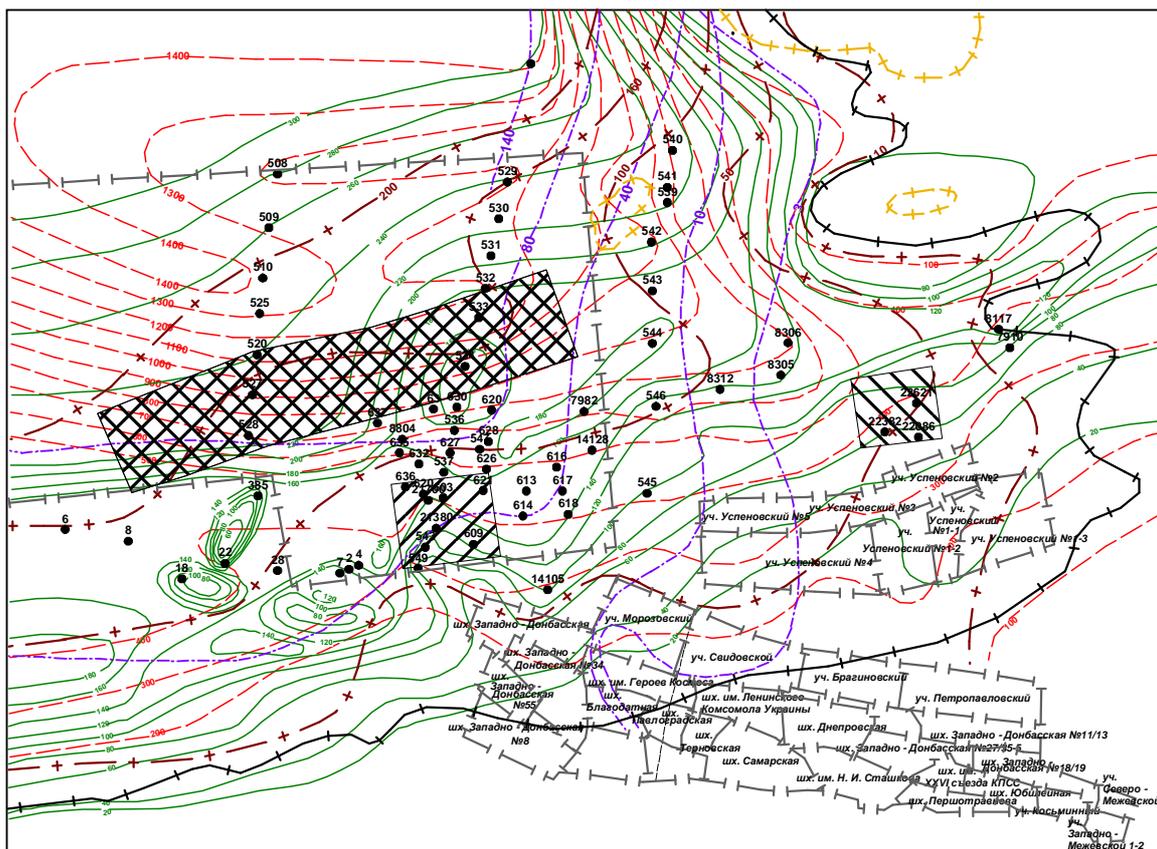
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ АККУМУЛИРОВАНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Введение. В настоящее время подземное хранение газа (ПХГ) в водоносных пластах является общепризнанной технологией, применяемой во всем мире [1]. Подземные газохранилища эксплуатируются в США (80 хранилищ общим объемом 90 млрд. м³), Канаде (30 хранилищ – 25 млрд. м³), России (10 хранилищ – 25 млрд. м³), Франции (3 хранилища – 1,5 млрд. м³) и в других странах. Анализ их работы показал [2], что средние удельные затраты на прирост 1 тыс. м³ активного объема в водоносных хранилищах 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 герметичностью, которая обеспечивает хранение парниковых газов, например, СО₂.

В Украине поиск геологических структур, пригодных для хранения газа, особенно актуален. Это обусловлено тем, что имеющиеся в распоряжении подземные хранилища большой емкости сосредоточены преимущественно на западе страны, откуда подача газа на восток и в центр Украины нерациональна. Кроме этого, использование для аккумуляции газа стальных резервуаров, имеющих вместимость до 500 тыс. м³, позволяет сглаживать лишь суточные колебания потребления, в то время как сезонные пики достигают сотен миллионов кубических метров. Применяемые в мировой практике для хранения газа такие типы природных резервуаров, как соляные полости и истощенные газовые и нефтяные залежи, не могут рассматриваться как альтернатива ввиду ограниченности их распространения на территории промышленных центров страны.

Постановка задачи. В работе [3] уже было показано, что в качестве емкостного ресурса, способного вмещать запасы природного газа в количестве 150 млн. м³, необходимые для покрытия сезонной неравномерности газопотребления в центральной части Украины, может быть использовано поровое пространство пермско-триасового водоносного горизонта, расположенного в пределах Левенцовской площади (1930 км²) Западного Донбасса (рис.1). Эксплуатация такого газохранилища будет сопровождаться периодической закачкой и отбором углеводородного газа, проникающего на довольно значительные расстояния и взаимодействующего с водоносным горизонтом по пути движения. Этот процесс ведёт к изменению порового пространства пород и значительному загрязнению геологической среды [4]. Кроме того, агрессивное воздействие газа на вмещающие породы может вызвать деструкцию их скелета, что создаст угрозу увеличения проницаемости и потери герметичности предполагаемого хранилища. В связи с этим целью данной работы является анализ горно-геологических условий Левенцовской структуры для проведения лабораторных исследований по оценке степени влияния аккумулируемого в ней газа на фильтрационные свойства пород-коллекторов.

Результаты работы. Согласно изысканиям, выполненным Павлоградской геологоразведочной экспедицией [5], мощность пермско-триасового водоносного горизонта 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 любо-



Условные обозначения

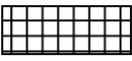
Участки:			
	– Северо-Орельская площадь;		– граница шахтных полей;
	– Левенцовская площадь;		– граница перспективной площади;
	– Первомайский полигон;		– граница юрских отложений;
			– граница отложений перми;
			– 50 – минерализация ВГ С ₂ ;
			– 10 – минерализация ВГ пермотриаса;
			– 100 – изолинии мощности пермотриаса;
			– 200 – изолинии глубин залегания кровли пермотриаса.

Рисунок 1 – Карта районирования территории Западного Донбасса по условиям захоронения шахтных вод в пермско-триасовых отложениях (масштаб 1:25 000 00) [5]

го 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. Кровля водоносного горизонта характеризуется наличием мощной толщи (110-200 м) региональных водоупоров, представленных нижнеюрскими, голубовато-серыми, монтмориллонитовыми глинами следующего гранулометрического состава: глинистых частиц 49,7-72,1%, пылеватых – 13,5-40,6% и песчаных – 0,5-12,6%. Наличие минералов монтмориллонита и дисперсионный состав частиц в покрывающих породах обуславливает их высокую экранирующую способ-

ность и почти полностью исключает утечки газа из пласта-коллектора в вышележащие породы. Почва пермско-триасового горизонта приурочена к отложениям среднего карбона, представленных толщей разнородных алевролитовых песчаников трещиноватого строения и обладающих большей, в сравнении с описанным водоносным горизонтом, проницаемостью.

С целью адекватного определения фильтрационных свойств водоносных пород Левенцовской структуры на ее территории были проведены опытно-фильтрационные работы (нагнетания, одиночные и кустовые откачки) [4], обработка результатов которых осуществлялась в программном комплексе „ANSDIMAT” (Institute of Environmental Geology, Россия) путем построения графиков временного, площадного и комбинированного прослеживания. По результатам расчетов установлены средние значения проницаемости пород пермско-триасового водоносного горизонта (крупнозернистых песчаников $3,2-4,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ и глинистых песков $1,7-2,9 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$) и его почвы (алевролитовых песчаников $6,5-7,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$). Отобранные в процессе проведения геологоразведочных работ пробы этих пород были использованы для лабораторных исследований. Размер и форма опытных образцов (длина – 76 мм, диаметр – 38 мм) принимались 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.2), 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.

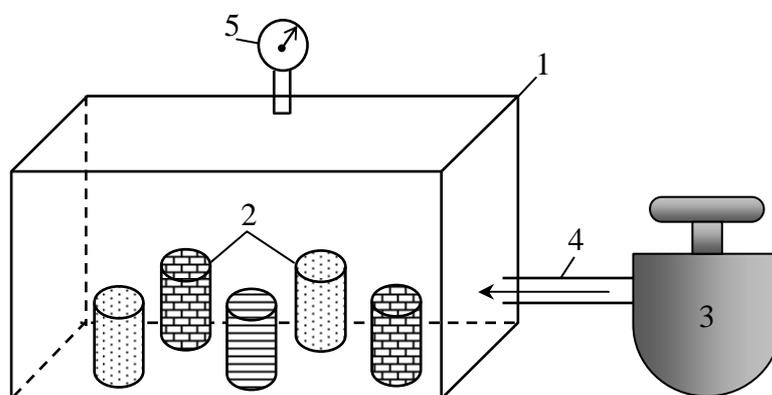


Рисунок 2 – Экспериментальная установка для оценки воздействия углеводородных газов на проницаемость горных пород: 1 – сосуд; 2 – образцы пород; 3 – резервуар с пропано-бутановой смесью; 4 – шланг; 5 – манометр

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 [6] 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 дефор-

маций. 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 нахождение средних значений проницаемости производились с помощью методов математической статистики. Такой режим испытаний поддерживался на всем протяжении эксперимента.

На рис.3 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%.

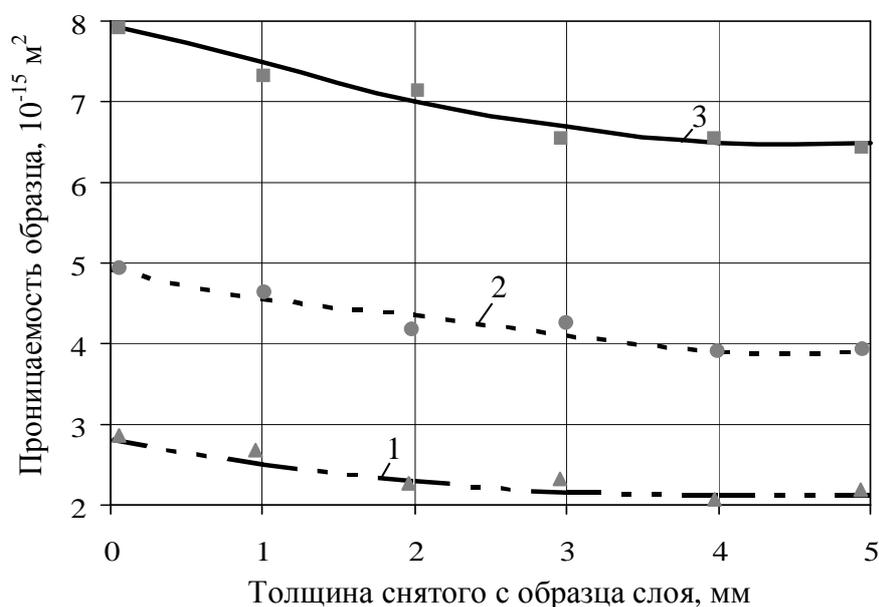


1, 2, 3 – соответственно глинистые пески, крупнозернистые и алевролитовые песчаники
Рисунок 3 – Изменение абсолютной проницаемости образцов горных пород при контакте с углеводородным газом

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 определения их начальной проницаемости 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.4, 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 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.



1, 2, 3 – глинистые пески, крупнозернистые и алевролитовые песчаники соответственно

Рисунок 4 – Изменение абсолютной проницаемости образцов, хранившихся в сжиженном газе, при равномерном удалении породы с их поверхности

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. м^3) природного газа. Кровля выделенного коллектора приурочена к нижнеюрским слабопроницаемым глинам, практически полностью исключающим возможность перетока газа в вышележащие породы, почва – к трещиноватым алевролитовым песчаникам. 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 вре-

мя 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aide-memoire de l'industrie du gaz. 4-me edition (1990) Association technique de l'industrie du gaz en France, Paris.
2. Бачурина Н.М. Экономическая эффективность создания и эксплуатации подземных хранилищ газа: автореф. дис. на соиск. научн. степ. канд. экон. наук: спец. 08.00.05 „Экономика и управление народным хозяйством” / Бачурина Нина Михайловна; Науч.-исслед. ин-т. природных газов и технологий. – М., 2002. – 28с.
3. Оценка потерь газа при его хранении в водоносных пластах Западного Донбасса / И.А.Садовенко, А.В.Инкин, З.Н.Якубовская [и др.] // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 6. – С.18-24.
4. Экология подземного хранения газов / [Бухгалтер Э.Б., Медиков Е.В., Бухгалтер Л.Б. и др.]. – М.: МАИК „Наука / Интерпериодика“, 2002. – 431с.
5. Горобец О.А. Отчет о поисках и оценке коллекторов для захоронения минерализованных шахтных вод Западного Донбасса / Горобец О.А., Держак С.В., Чемерис Б.Б. – Павлоград: ГРЭ ПГО „Донбассгеология“, 1985. – 219с.
6. Амикс Д. Физика нефтяного пласта / Амикс Д., Басс Д., Уайтинг Р. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 572с.

Поступила в редколлегию 08.04.2014.

УДК 621.63+621.51

ГОЦУЛЕНКО В.В., к.т.н., ст. науч. сотр.
ГОЦУЛЕНКО В.Н.*, к.т.н., доцент

Институт технической теплофизики НАН Украины
*Институт предпринимательства “Стратегия”, г. Желтые Воды

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ (ПОМПАЖА) ВЕНТИЛЯТОРА РЕЗОНАТОРОМ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Введение. Динамическое демпфирование автоколебаний вибрационного горения в жидкостных реактивных двигателях (ЖРД) осуществляется резонатором Гельмгольца и антипульсационными перегородками [1, 2], а также резонансными поглотителями, рассмотренными в [3, 4].

Эффективным снижением амплитуды автоколебаний является также присоединение дополнительного демпфирующего $L_a C_a$ – колебательного контура [5]. Механическим аналогом таких акустических поглотителей является динамический гаситель механических автоколебаний [6].

В случае демпфирования колебаний в линейных системах наибольшее снижение амплитуды наблюдается при совпадении частот в основном контуре и резонаторе. В нелинейной системе „поющего пламени” в вертикальной трубе при присоединении демпфирующего контура амплитуда автоколебаний снижалась до минимальной при $L_a = L_{a,д}$ и $C_a = C_{a,д}$ [7], где $L_{a,д}$ и $C_{a,д}$ – акустические параметры демпфирующего контура. Однако это условие может изменяться из-за нелинейных свойств системы.

В [8], используя резонатор Гельмгольца, рассмотрено демпфирование автоколе-