

УДК 550.8.053

В.М. Троицкий, А.В. Мизин, В.П. Ваньков, Е.О. Семёнов

Экспериментальное изучение подвижности гелия с целью оценки экранирующих свойств подземных хранилищ гелиевого концентрата

Ключевые слова:

физическое моделирование пластовых процессов, гелий, гелиевый концентрат, экранирующие свойства глинистой покрышки.

Keywords:

physical modelling of formation processes, helium, helium concentrate, screening properties of clay cap rocks.

Газ крупнейших газо- и нефтегазоконденсатных месторождений (ГКМ и НГКМ) Восточной Сибири, включая Ковыктинское, Юрубчено-Тохомское, Собинско-Пайгинское, а также Республики Саха (Якутия) – Чаяндинского, Тас-Юряхского, отличается промышленным содержанием гелия. Низкие объемы потребления гелия как российской, так и мировой промышленностью требуют обеспечения его длительного хранения (сроком до ста и более лет). Интегральная оценка потенциальных запасов гелия в пределах Чаяндинского центра газодобычи (от 0,2 до 0,6 %) свидетельствует о возможности получения гелия в промышленных масштабах, сопоставимых с мировым производством, и позволяет определить необходимый объем его хранения – около 5 млрд м³. Наиболее полно геолого-технологическим требованиям к объекту хранения гелиевого концентрата на Чаяндинском НГКМ отвечает пласт-коллектор хамакинского горизонта Саманчакинского блока [1].

Одной из первоочередных задач при создании подземных газовых хранилищ является оценка надежности пород покрышки. Это особенно важно при создании хранилищ гелия, который обладает высокой проникающей способностью. Для оценки экранирующих свойств необходимо изучить характеристики покрышки на макроуровне (выдержанность, толщину, однородность, наличие разрывных нарушений) и микроуровне (фракционный и минералогический состав, структуру порового пространства, проницаемость, величину давления прорыва газа).

В настоящей статье рассматриваются результаты изучения на микроуровне экранирующих свойств глинистых пород верхнепаршинской подсвиты. Глинистая толща верхнепаршинской подсвиты толщиной 90–95 м на Саманчакинском блоке Чаяндинского НГКМ экранирует газоконденсатную залежь хамакинского горизонта, которая выбрана в качестве возможного объекта для создания подземного хранилища гелиевого концентрата (ПХГК).

Для изучения экранирующих характеристик пород покрышки хамакинского горизонта из керна, поднятого при бурении разведочной скв. 321-57, были отобраны образцы из нижней части покрышки верхнепаршинской подсвиты, которые впоследствии исследовались с целью определения:

- фракционного и минералогического состава;
- структуры порового пространства;
- проницаемости по гелию в условиях, моделирующих пластовые;
- давления прорыва газа через образцы покрышки, насыщенные жидкостью.

Экранирующие свойства глинистых покрышек в значительной степени зависят от фациальных условий и возрастают по мере увеличения глубин бассейна осадконакопления. Низкими экранирующими свойствами обладают глины, сформировавшиеся в условиях мелкого шельфа и прибрежного мелководья, а наиболее высокими – сформировавшиеся в условиях глубоководного шельфа и прилегающих частей моря. При этом лучшие экранирующие характеристики имеют глинистые породы, характеризующиеся высокой степенью дисперсности, преобладанием в составе разбухающих минералов (смектит, смешаннослойный смектит-иллит) и пониженным содержанием обломочного материала [2, 3]. Значительная толщина (30–100 м), однородный литологический состав и выдержанность глинистых по-

род верхнепаршинской подствиты на всей территории Непско-Ботубинского свода свидетельствуют о том, что эта покрывка является региональным флюидоупором, формирование которого происходило в условиях глубоководного шельфа.

Результаты определения фракционного состава образцов из нижней части глинистой покрывки хамакинского горизонта указывают на то, что неколлектороформирующие фракции породы (сумма содержания частиц пелитовой и мелкоалевритовой размерности) составляют 65–70 %, из которых доля глинистой фракции ($< 0,01$ мм) составляет 30–35 %. Крупноалевритовая фракция, снижающая экраняющие характеристики глин, содержится в количестве 30–35 %. По данным петрографического изучения шлифов, крупноалевритовый материал распределен в глинистой массе неравномерно. Как правило, зерна алеврита обогащают отдельные микропрослои толщиной 1–10 мм.

Анализ фракции $< 0,001$ мм, содержащей только глинистые минералы, позволил определить минералогический состав глин верхнепар-

шинской свиты. Состав глин полиминеральный: преобладает иллит, содержание которого составляет 60–65 %. Смешаннослойный иллит-сметит содержится в количестве 20–25 %, каолинит и хлорит – 7–11 и 3–5 % соответственно.

По данным ртутной порометрии (рис. 1), структура порового пространства в глинистом алевролите верхнепаршинской подствиты характеризуется узким диапазоном распределения пор ($d = 0,016–0,1$ мкм). Максимальный диаметр пор – 0,16 мкм (менее 1 %). Диапазон распределения основных размеров пор (более 92 %) составляют поры с $d = 0,016–0,04$ мкм.

Таким образом, по структурным и минералогическим характеристикам верхнепаршинские глины Чаядинского НГКМ соответствуют глинистым породам с высокой экраняющей способностью [2].

С целью возможной оценки максимально допустимого давления закачки, которое является одним из важнейших технологических показателей подземных газохранилищ, выполнены эксперименты по определению давления прорыва концентрата гелиевого газа на образцах глинистых пород из верхнепаршинской свиты.

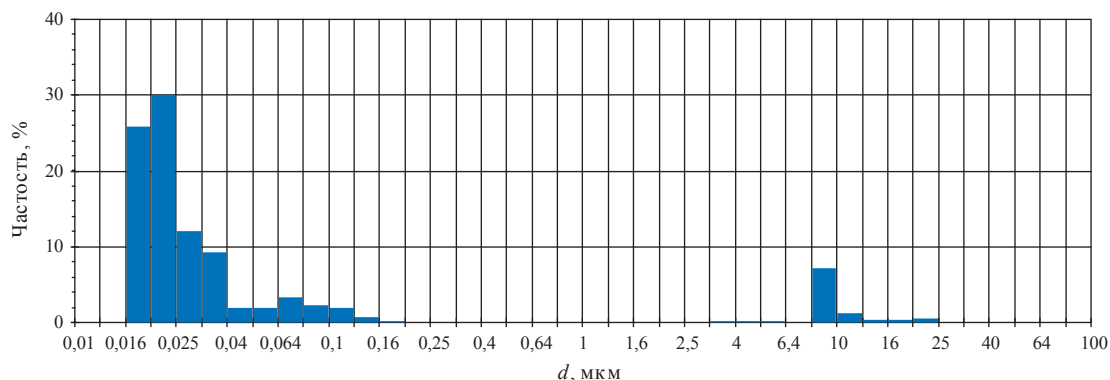


Рис. 1. Результаты ртутной порометрии для керна глинистой покрывки хамакинского горизонта

Измерение абсолютной проницаемости

Для измерения абсолютной проницаемости по гелию была собрана гидравлическая схема на основе высокоточных измерительных насосов Quizix (США), предполагающая постоянный компьютерный контроль расхода на входе в образец. Блок-схема установки показана на рис. 2.

При исследовании фильтрационных свойств глинистой покрывки, обладающей крайне малой проницаемостью, необходимым свойством системы фильтрации является точ-

ное задание малых расходов газа на измерительном насосе 1 в режиме поддержания постоянного пластового давления на входе в образец. Данная фильтрационная система позволяет производить поддержание расхода газа с точностью до $4,1 \cdot 10^{-4}$ см³/мин.

Для проведения опытов выбраны образцы глинистой покрывки, выбуренные перпендикулярно напластованию, которые поочередно помещались в кернодержатель 2 гидростатического типа. Гелий из аккумулятора

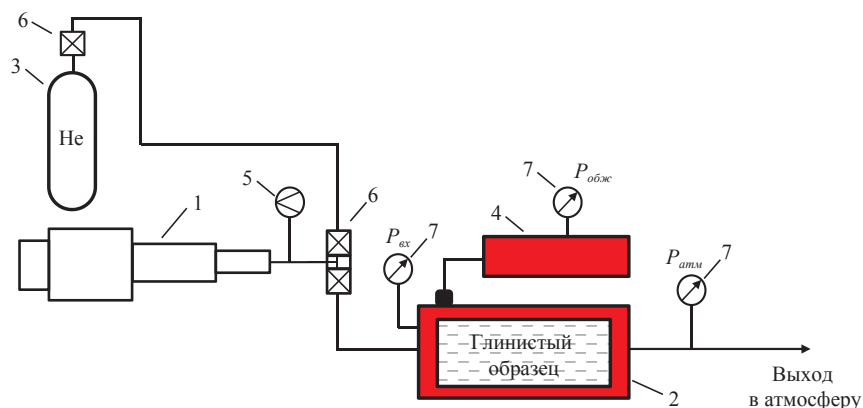


Рис. 2. Гидравлическая схема по определению абсолютной проницаемости по гелию для образцов глинистого газупора: 1 – измерительный насос; 2 – кернодержатель; 3 – аккумулятор с плавающим поршнем для гелия; 4 – блок создания и поддержания обжимного давления; 5 – расходомер; 6 – вентили; 7 – манометры

с плавающим поршнем 3 через вентили 6 подавался в измерительный насос 1. Далее с помощью измерительного насоса 1 осуществлялась фильтрация газа через образцы, при этом давление на входе в кернодержатель поддерживалось постоянным, а расход газа прецизионно измерялся с помощью расходомера 5. Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 26450.2-85 [4] при стационарном режиме линейной фильтрации газа через высушенные цилиндрические образцы до достижения стабильных значений расхода газа, при постоянных значениях входного давления и температуры опыта. Обжимное давление 35 МПа, соответствующее среднему горному давлению для данного интервала отбора кернового материала, устанавливается блоком создания и поддержания обжимного давления 4. Время одного опыта составляло от 20 до 70 ч. В ходе эксперимента поддерживался стабильный перепад давления $\Delta P = P_{вх} - P_{вых} = 1,5$ МПа, а расход гелия через образец стабилизировался через 400–600 мин после начала фильтрации.

Результаты измерения абсолютной проницаемости образцов по гелию представлены в табл. 1.

Согласно данным табл. 1, измеренные значения проницаемости составляют $1,33\text{--}2,61 \cdot 10^{-7}$ мкм², что соответствует породам со средней экранирующей способностью (согласно классификации А.А. Ханина для месторождений углеводородов [5]).

Измерение давления прорыва

В основу методики измерения давления прорыва газа и общей оценки экранирующей способности глинистых пород положен способ, приведенный в работе [5]. В указанной методике эксперимент проводился на образцах глин длиной 30 мм, насыщенных керосином, а в качестве газа использовался азот. Под давлением прорыва газа принималось минимальное давление, при котором через образец глинистой крышки, насыщенный керосином, начинается движение газа. В настоящей работе в качестве газа для прорыва образцов крышек использовались гелий и гелиевый концентрат, при этом образцы глины насыщались деканом. Гелиевый концентрат моделировался в эксперименте смесями гелия и азота в различных концентрациях. Газовая смесь из чистых гелия и азота (чистота компонентов – 99,9995 %)

Таблица 1

Параметры глинистых образцов и результаты измерения абсолютной проницаемости по гелию

№ образца	Длина образца, см	Диаметр образца, см	Коэффициент абсолютной проницаемости по гелию, мкм ²
1	3,14	2,895	$2,61 \cdot 10^{-7}$
2	3,16	2,885	$1,33 \cdot 10^{-7}$
3	2,42	2,967	$1,86 \cdot 10^{-7}$

создавалась в аккумуляторе на основе расчетов (с применением специализированного программного обеспечения).

На рис. 3 показана блок-схема установки для измерения давления прорыва.

Основными узлами установки являются измерительный насос 1, кернодержатель гидростатического типа 2, индикатор прорыва газа 8 и хроматограф 12. Блок создания и поддержания обжимного давления 4 обеспечивает внешний обжим образца, что имитирует создание горного давления в кернодержателе. Обжимное давление препятствует проникновению и скольжению газа в пространстве меж-

ду керновым образцом и манжетой кернодержателя. Для этого в обычных фильтрационных экспериментах достаточно создавать обжимное давление, на 10 МПа превышающее внутривязное (или давление на входе в образец). Так как гелий обладает большой проникающей способностью, для установки измерения давления прорыва гелия выбрано более высокое значение обжимного давления, составившее 35 МПа. Система компьютерного контроля и управления осуществляет задание, регистрацию и сохранение основных параметров и режимов эксперимента.

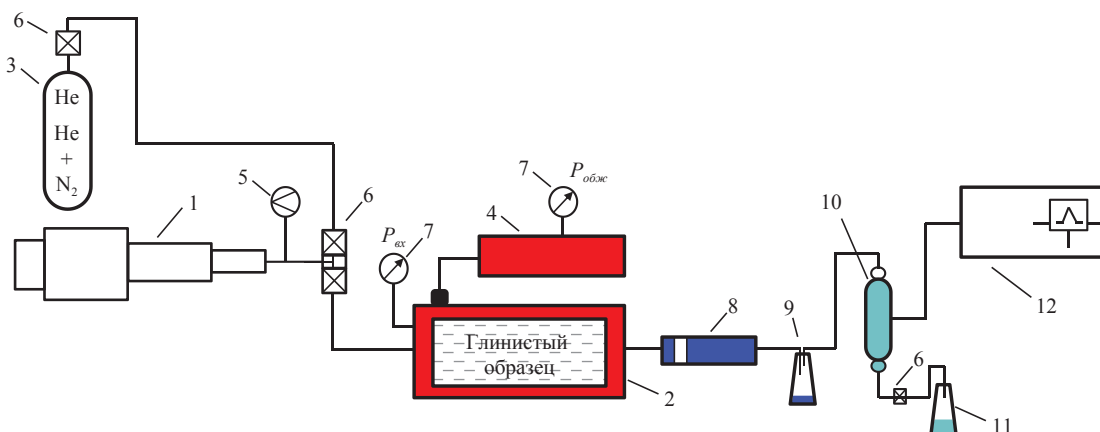


Рис. 3. Гидравлическая схема установки для определения давления прорыва смеси гелия и азота в образцах глинистого газупора: 1 – измерительный насос; 2 – кернодержатель; 3 – аккумулятор с плавающим поршнем для гелия или смеси гелий+азот; 4 – блок создания и поддержания обжимного давления; 5 – расходомер; 6 – вентили; 7 – манометры; 8 – индикатор прорыва газа; 9 – емкость для сбора декана; 10 – ловушка для газа с гидрозатвором; 11 – емкость с пересыщенным соляным раствором; 12 – газовый хроматограф Varian CP-3800

Процедура измерения

В процессе эксперимента на вход образца, находящегося под обжимным давлением около 35 МПа, с помощью измерительного насоса 1 из аккумулятора 3 подается газовая смесь. Измерительный насос 1 работает в режиме поддержания постоянного давления на входе. Выходящий газ после прорыва из кернодержателя 2 поступает в индикатор прорыва 8 и затем через ловушку для газа с гидрозатвором 10, заполненную пересыщенным раствором NaCl (360 г/дм³), подается на газовый хроматограф 12 для анализа состава. Фиксация прорыва газа осуществляется в индикаторе прорыва 8 визуально по началу движения пузырька газа в про-

зрачном капилляре, подключенном к выходу кернодержателя 2.

Давление газа на входе кернодержателя 2, измеряемое манометром 7, задается измерительным насосом 1, работающим в режиме поддержания постоянного давления. Начальное значение входного давления выбирается исходя из анализа результатов определения проницаемости и структуры порового пространства образцов покрывки. Согласно [5], для глин верхнепаршинской подсвиты прогнозные величины давления прорыва могут составлять ~5 МПа. Следовательно, начальное давление должно составлять 10 % от этой величины, т.е. 0,5 МПа.

Важным параметром в эксперименте является время выдержки образца под давлением, которое для образцов длиной 30 мм составляло от 3 до 25,5 ч [5]. Однако, по мнению авторов настоящей работы, время на каждой ступени нагружения должно составлять более двух суток. Если в течение этого периода прорыва газа не наступает, переходят к следующей ступени более высокого значения входного давления. Увеличение давления от ступени к ступени определяется необходимой точностью измерения давления прорыва и может составлять от 0,2 до 1 МПа. С этой целью реализовывались 5–7 ступеней поднятия давления. В результате время, необходимое на измерение давления прорыва одного образца, составляло от 143 до 318 ч.

После регистрации момента прорыва эксперимент продолжался для отбора пробы газовой смеси и последующего хроматографического анализа.

Оценка погрешности измерений

Погрешность измерения давления прорыва образцов глинистой покрышки в значительной степени зависит от размера ступени повышения давления. Для проводимых измерений был выбран размер изменения ступени давления, равный 0,5 МПа. Тогда абсолютная погрешность измерения составит 0,25 МПа, и следовательно, относительная погрешность измерения давления прорыва будет находиться в пределах 4–7 %.

Дополнительные погрешности могут быть связаны с индивидуальными характеристиками подготовленных образцов покрышки, их исходных свойств (пористости, проницаемости, структуры порового пространства, наличия техногенных нарушений). В ходе работ для проведения опытов подбирались образцы с однотипными характеристиками по пористости и проницаемости (измеренными по газу), чтобы

снизить влияние индивидуальных погрешностей. Однако полностью исключить их влияние, как и оценить размеры этих погрешностей без дополнительных исследований, затруднительно.

Результаты измерений давления прорыва и состава смеси

Для измерения давления прорыва были выбраны три образца глинистой покрышки. Измерения проводились на насыщенных н-деканом образцах. Время одного опыта составляло от 143 до 318 ч. Всего проведено четыре эксперимента для разных смесей гелиевого концентрата. Определение компонентного состава смеси перед опытом и на выходе по его окончании проводилось с помощью газового хроматографа Varian CP-3800. Результаты представлены в табл. 2. Величина давления прорыва гелия соизмерима с величиной давления прорыва гелиевого концентрата (смеси гелия и азота). Давление прорыва гелия на образце глинистого алевролита верхнепаршинской свиты составляет 3–4 МПа.

Анализ компонентного состава исходного и выходящего после прорыва через насыщенный деканом образец глины газа свидетельствует о снижении содержания гелия на выходе модели в пределах 5–10 % (табл. 3). Полученный результат может быть обусловлен либо утечкой гелия через резиновую манжету кернодержателя в связи с высокой проникающей способностью гелия, либо большей сорбционной способностью глинистой покрышки по отношению к гелию (по сравнению с азотом).

В результате выполненных экспериментальных работ предложены методика и гидравлическая схема эксперимента по определению фильтрационных характеристик глинистых пород с проницаемостью $< 1 \cdot 10^{-6}$ мкм² по гелию.

Создана установка для определения давления прорыва газа через глинистые образцы с

Таблица 2

Результаты измерения давления прорыва через глинистые образцы хамакинского горизонта (сводная по всем опытам)

№ опыта	Объемное содержание гелия в гелиевом концентрате, %	Объемное содержание азота в гелиевом концентрате, %	Зарегистрированное значение давления прорыва, МПа
1	100	0	4,012
2	50,69	49,31	4,012
3	25,52	74,48	3,688
4	78,35	21,65	3,688

Таблица 3

Изменение состава смесей по данным хроматографического анализа

№ опыта	Состав исходной смеси с учетом примесей, % мольн.		Состав смеси на выходе с учетом примесей, % мольн.	
	гелий	азот	гелий	азот
Опыт 2	50,69	49,31	47,69	51,18
Опыт 3	25,52	74,48	20,12	79,88
Опыт 4	78,35	21,65	70,47	29,53

использованием высокоточных измерительных насосов, работающих в автоматизированном режиме, что позволило значительно увеличить время выдержки образцов под испытательным давлением репрессии.

На основании экспериментальных исследований установлено следующее:

- давление прорыва гелиевого концентрата в глинистых покрышках не зависит от концентрации гелия в смеси газа в пределах ошибки измерений;
- состав газа на выходе модели пласта характеризуется пониженным содержанием гелия.

Полученные структурно-минералогические, фильтрационные и флюидоупорные характеристики глин свидетельствуют о высокой экранирующей способности покрышки хамакинского горизонта для создания долговременного хранилища гелиевого концентрата в южной части Саманчакинского блока Чаяндинского НГКМ.

Список литературы

1. Люгай Д.В. Геологические перспективы создания хранилища гелия в пределах Чаяндинского центра газодобычи / Д.В. Люгай, Д.В. Изюмченко, Г.П. Косачук и др. // Газовая промышленность. – 2010. – № 2. – С. 62–67.
2. Семёнов Е.О. Оценка экранирующей способности глинистых пород и критерии их герметичности при создании газохранилищ в водоносных пластах / Е.О. Семёнов // Газовая промышленность. – 684/2012. – С. 19–23. – (Спецвыпуск «ПХГ»).
3. Осипов В.И. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений / В.И. Осипов, В.Н. Соколов, В.В. Еремеев. – М.: Недра, 2001. – 238 с.
4. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.
5. Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа / А.А. Ханин. – М.: Недра, 1969. – С. 237–245.