

# РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.276

**И.А. Садовенко<sup>1</sup>**, д-р. техн. наук, проф.,  
**А.В. Инкин<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц.,  
**З.Н. Якубовская<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**Н.А. Максимова-Гуляева<sup>1</sup>**, канд. техн. наук

1 – Государственное высшее учебное заведение  
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: inkin@ua.fm  
2 – Государственное высшее учебное заведение  
„Украинский государственный химико-технологический  
университет“, г. Днепропетровск, Украина

## ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ГАЗА ПРИ ЕГО ХРАНЕНИИ В ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

**I.A. Sadovenko<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
**A.V. Inkin<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
**Z.N. Yakubovskaya<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Tech.),  
**N.A. Maksimova-Gulyayeva<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Tech.)

1 – State Higher Educational Institution “National Mining  
University”, Dnepropetrovsk, Ukraine,  
e-mail: vladislav3000@mail.ru  
2 – State Higher Educational Institution “Ukrainian State  
University of Chemical Engineering”, Dnepropetrovsk, Ukraine

## EVALUATION OF GAS LOSSES DURING STORAGE IN AQUIFERS OF THE WESTERN DONIETS BASIN

**Цель.** Оценка влияния капиллярных сил, диффузии и гравитации на формирование внутрипластовых потерь газа при эксплуатации водоносного газохранилища.

**Методика.** Разработана и применена методика, основанная на аналитическом моделировании динамики газовой контактной поверхности и расчете потерь газа за счет диффузии, растворения и заколонного перетока, которая позволяет оценить суммарные безвозвратные потери газа на всех этапах работы хранилища. Верификация модели выполнена для горно-геологических условий Левенцовской структуры Западного Донбасса.

**Результаты.** Определена форма газовой контактной поверхности в зависимости от его глубины и радиуса в течение четырех недель после начала закачки газа в водоносный пласт. Потери газа за один цикл работы газохранилища за счет диффузии и растворения составят 1,76% от его активного объема. Утечки газа из пласта-коллектора через цементное кольцо оцениваются в диапазоне  $4 \div 13 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с, а в пределах кольцевых каналов достигают  $1 \div 7 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. При этом их максимальные величины соответствуют периодам нагнетания газа в хранилище, а минимальные – периодам хранения и отбора газа. Суммарный переток газа по заколонному пространству при закачке может превысить 600 м<sup>3</sup>/сут, в остальное время составит около 120 м<sup>3</sup>/сут, что дает общий годовой объем потерь 103,34 тыс. м<sup>3</sup>/год или 0,07% от активного объема хранимого газа.

**Научная новизна.** Путем моделирования выполнена оценка влияния капиллярных сил, процессов диффузии и гравитации на формирование внутрипластовых потерь газа на различных этапах эксплуатации водоносного газохранилища.

**Практическая значимость.** Установлено, что суммарные безвозвратные потери, вызванные растворением газа, его перетоком через кровлю коллектора и заколонное пространство скважины, не превысят 4% объема аккумулируемого газа. Такая величина потерь является допустимой с учетом мирового опыта работы подземных газохранилищ.

**Ключевые слова:** водоносное газохранилище, потери газа, газовой контактной поверхности, диффузия, растворение

**Постановка проблемы.** Одним из основных элементов энергетического комплекса Украины являются подземные хранилища газа (ПХГ), обеспечивающие стабильную и бесперебойную подачу энергоносителей внутренним и зарубежным потребителям. Необходимость их развития обусловлена не только высокой сезонной неравномерностью использования топлива, но и большой удаленностью крупных промышленных

центров от мест добычи и поставок газа. Для обеспечения длительного и безопасного функционирования хранилищ необходимо минимизировать неконтролируемые потери газа в вертикальном и горизонтальном направлениях практически на всех крупных искусственных газовых залежах, созданных в различных геологических структурах (табл. 1).

**Анализ последних исследований и публикаций.** Научно-производственный опыт эксплуатации ПХГ показал, что потери газа могут быть вызваны геологическими, техническими и технологическими причинами

ми [1]. Их средняя величина изменяется от 3,1 до 4,4% объема активного газа в хранилище. Как правило, утечки фиксируются на позднем этапе этого процесса, при появлении газа на поверхности или в контрольных горизонтах. Это существенно осложняет дальнейшую работу газохранилищ и требует разработки способов контроля их герметичности на стадии проектирования. В работе [2] уже была обоснована возможность создания водоносного газохранилища в пределах Левенцовской площади Западного Донбасса, а также установлены возможные утечки газа через породы кровли в процессе его эксплуатации.

**Целью данной работы** является оценка потенциальных потерь сберегаемого в этой структуре газа за счет гидродинамических, физико-химических и технологических факторов.

**Изложение основного материала исследований.** При построении математической модели, которая от-

ражает реальные процессы, протекающие в хранилище, необходимо учитывать, что газ и вода имеют различные физические свойства – плотность, вязкость, поверхностное натяжение и растворимость, которые приводят к некоторым особенностям фильтрации их смеси. Процесс закачки газа в пласт сопровождается его всплыванием под водоупор и преимущественным заполнением верхней части коллектора. Возникающее при этом неравномерное вытеснение по сечению пласта приводит к неполному насыщению водоносного горизонта и опасности утечек газа за пределы хранилища. Для предотвращения этих явлений необходимо рассмотреть деформацию газовой полости и произвести оценку соотношения толщины газового слоя и мощности пласта в пределах проектируемого газохранилища. Это может быть выполнено с помощью алгоритма М.В. Лурье [3].

Таблица 1

Потери газа в подземных газохранилищах

ПХГ	Страна	Первая закачка газа	Обнаружение перетока	Объект хранения	Процент потерь	Состояние ПХГ в настоящее время
Лерой	США	1972 г.	1978 г.	Водоносный пласт	3,9	Эксплуатируется с перетоком
Эшенфельд	Германия	1967 г.	1969 г.	Водоносный пласт	4,2	Эксплуатируется с перетоком
Лаб	Словакия	1971 г.	1973 г.	Газовое месторождение	3,1	Переток ликвидирован
Осиповичское	Беларусь	1976 г.	1978 г.	Водоносный пласт	4,4	Эксплуатируется с перетоком
Северо-Сохское	Узбекистан	1978 г.	1987 г.	Газовое месторождение	3,7	Переток ликвидирован
Рязанское	Россия	1958 г.	1959 г.	Водоносный пласт	3,1	Хранилище ликвидировано
Гатчинское	Россия	1963 г.	1965 г.	Водоносный пласт	3,6	Эксплуатируется с перетоком

Для данного объекта пласт можно считать горизонтальным, постоянной мощности  $H$  с непроницаемой кровлей и подошвой. Движение воды принимается осесимметричным (OZ – ось симметрии,  $r$  – радиальная координата) и описывается законом Дарси

$$u = -\frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial r}; v = -\frac{k}{\mu_g} \left( \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_g g \right), \quad (1)$$

где  $u, v$  – радиальная и вертикальная составляющие скорости фильтрации воды;  $k$  – коэффициент проницаемости породы;  $\mu_g, \rho_g$  – соответственно, вязкость и плотность пластовых вод;  $g$  – ускорение свободного падения;  $p$  – давление воды.

Учитывая малую вязкость газа, давление в газовой полости  $p_z$  можно считать постоянным

$$p_z = const, (p_z > p_k), \quad (2)$$

где  $p_k$  – давление воды на подошве пласта по контуру депрессии  $r = R_k$ .

Давление на контуре депрессии распределено во времени  $t$  по гидростатическому закону

$$p(R_k, z, t) = p_k - \rho_g g z. \quad (3)$$

На кровле ( $z = 0$ ) и подошве ( $z = H$ ) пласта выполняется условие водонепроницаемости границ, поэтому

$$\left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=0, z=H} = -\rho_g g. \quad (4)$$

Расширение газовой полости при закачке газа определяется уравнением Лапласа

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0, \quad (5)$$

описывающим движение воды в водоносном горизонте с граничными условиями (2) – (4). Условие (2) задается на подвижной границе  $\Gamma$  – границе газодляного контакта (ГВК), положение которой определяется из условия Кельвина

$$n \frac{\partial F}{\partial t} + v \frac{\partial F}{\partial z} = u, \quad (6)$$

где  $r = F(z, t)$  – функция, описывающая границу газодляного контакта (ГВК);  $n$  – средняя пористость пласта.

В качестве начального условия принимается, что газовая полость имеет форму цилиндра, радиус которого  $r_0$  определяется исходя из объема буферного газа.

Решая численно уравнение (5) при фиксированном положении ГВК, с учетом (1), можно найти скорости на подвижной границе. Новое положение ГВК уточняется на основании условия (6). После этого численное решение определяется в измененной области фильтрации газа. Алгоритм повторяется до установления положения равновесия ГВК.

Применительно к Левенцовской структуре, приняты следующие расчетные параметры:  $r_0 = 400$  м;  $R_k = 24$  км;  $k = 10^{-3}$  Д;  $p_c = 5,0$  МПа;  $H = 120$  м;  $n = 0,25$ ;  $\mu_g = 1,5$  Пз;  $p_k = 3,2$  МПа. Расчеты показывают (рис. 1), что при равномерной закачке газа по всей мощности пласта нижняя часть водяного пласта остается заполненной водой и не участвует в процессе его распространения. Очевидно, что для более полного использования порового пространства и предотвращения ухода газа за пределы хранилища следует производить закачку газа не по всей мощности пласта, а в его нижнюю часть.

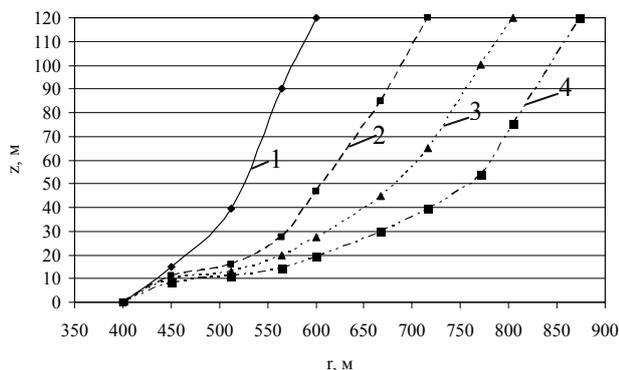


Рис.1 Изменение границы газодляного контакта по глубине ( $z$ ) и радиусу ( $r$ ) во времени: 1, 2, 3, 4 – положение ГВК через одну, две, три и четыре недели после начала закачки соответственно

Эксплуатация ПХГ также сопровождается процессами диффузии и растворения закачанного газа. В буферный объем переходит газ, растворенный в пластовой воде и сорбированный горными породами. По данным А.Ю. Намиота и М.М. Бондаревой [4], растворимость метана в чистой воде при избыточном давлении 3,5–7,5 МПа составляет 1–1,75 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. При закачке газа газонасыщенный поровый объем увеличивается на  $\Delta V_n$ , эквивалентный объем пластовой воды с концентрацией растворенного газа  $C$  вытесняется за пределы газовой полости и смешивается с пластовой водой, не содержащей газ. При отборе газа происходит подток пластовой воды с меньшим газосодержанием в область ПХГ. Таким образом, часть газа оказывается потерянной.

Данный процесс описывается уравнением конвективной диффузии. Радиальную диффузию допустимо рассматривать как одномерную

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_\phi \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (7)$$

где  $C$  – концентрация растворенного газа;  $D_\phi$  – коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии можно рассчитать согласно методу, предложенному М.В. Лурье [5], рассмотрев работу ПХГ в предельном цикле. Тогда

$$D_\phi = \frac{(\Delta V_n)^2}{2\theta}, \quad \text{где } \theta \text{ – время одного цикла (1 год).}$$

Увеличение газонасыщенного порового объема рассчитывается по формуле  $\Delta V_n = \frac{\rho_{cm}}{p/Z} (V_2 - V_1)$ ,

где  $\rho_{cm}$  – плотность газа при нормальных условиях;  $p/Z$  – приведенное давление в пласте;  $(V_2 - V_1)$  – разность объемов газа в ПХГ, соответствующих максимальному и минимальному газонасыщению при данном давлении.

Пусть концентрация растворенного газа в пределах газовой полости равна  $C_0$ , за пределами полости равна нулю

$$C(0, t) = C_0; \quad C(0, R) = 0.$$

Тогда решение (7) принимает вид

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D_\phi t}}} e^{-z^2} dz \right).$$

Объем газа, мигрировавшего за пределы ПХГ за счет диффузии, составляет

$$W = \int_0^t (-D_\phi \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0}) dt. \quad (8)$$

Решение (8) можно записать в виде

$$W(N) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} C_0 \Delta V_n \sqrt{N},$$

где  $N$  – число полных циклов.

Для активного объема 150 млн м<sup>3</sup>, приведенного давления  $p/Z = 3,6$  МПа, разности объемов  $V_2 - V_1 = 120$  млн м<sup>3</sup> и концентрации растворенного газа  $C_0 = 1$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, убыль природного газа в ПХГ составит, млн м<sup>3</sup>

$$W(N) = 2,64 \sqrt{N}.$$

В процентном соотношении за один цикл потери составляют 1,76% от активного объема газа в хранилище.

Рассматривая процессы двухфазной фильтрации в неоднородной пористой среде, необходимо учитывать капиллярные явления, протекающие в поровых каналах. Капиллярное давление,

возникающее на границе жидкости и газа, всегда направлено в сторону газа и равно  $p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}$ , где  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе вода-газ;  $r$  – радиус капилляра;  $\theta$  – угол смачивания. И.А. Чарным [6] приведены опытные данные для капиллярного давления (табл. 2).

Эти данные показывают, что на ПХГ капиллярное давление в порах менее проницаемых пропластков может быть соизмеримо с репрессиями, создаваемыми при закачке газа. При вытеснении газом воды разница капиллярных давлений, вызванная неоднородностью пласта, приведет к тому, что низкопроницаемые участки не будут заполнены газом, в результате объем коллектора для хранения газа уменьшается. При отборе газа вода будет быстрее продвигаться по пустым каналам, что приведет к защемлению и неполному извлечению газа. Однако после выхода хранилища на режим предельного цикла наступает стабилизация и полезный объем хранилища не уменьшается.

Таблица 2

Опытные данные для капиллярных давлений

№ образца	Проницаемость образца, дарси	Минимальное капиллярное давление, МПа · 10 <sup>-2</sup>
1	0,25	1,35
2	1,9	0,52
3	4,5	0,21

Для интенсификации вытеснения жидкости газом в коллекторах ПХГ можно использовать физико-химические способы, в основе которых лежит применение поверхностно активных веществ (ПАВ) для создания буферного объема между нагнетаемым газом и вытесняемой жидкостью. При этом вытесняющим агентом становится газожидкостная дисперсная система, вязкость которой соизмерима с вязкостью воды, и поверхностное натяжение на границе газ-вода уменьшается. Коэффициент вытеснения пластовых вод зависит от концентрации ПАВ в растворе. Значение концентрации ПАВ оптимально в пределах 0,3–0,5% [3]. При этом вытеснение почти поршневое. По мере продвижения концентрация ПАВ в растворе уменьшается вследствие адсорбции и конвективной диффузии, и влияние буферного объема перестает сказываться на вытеснении пластовой жидкости.

К техническим факторам, влияющим на потери газа из хранилища, в основном, относят состояние скважин, вскрывающих пласт-коллектор. Значительные осложнения возникают при искусственной гидродинамической связи основного газонасыщенного пласта и вышелегающих проницаемых пород над крышкой хранилища. Межпластовой заколонный переток чаще всего происходит по цементированному пространству между породным контуром скважины и обсадной колонной. В этом случае каналы перетоков формируются в цементном камне, кольцевых зазорах между обсадной колонной и цементным кольцом, а также цементным кольцом и контуром скважины (рис. 2).

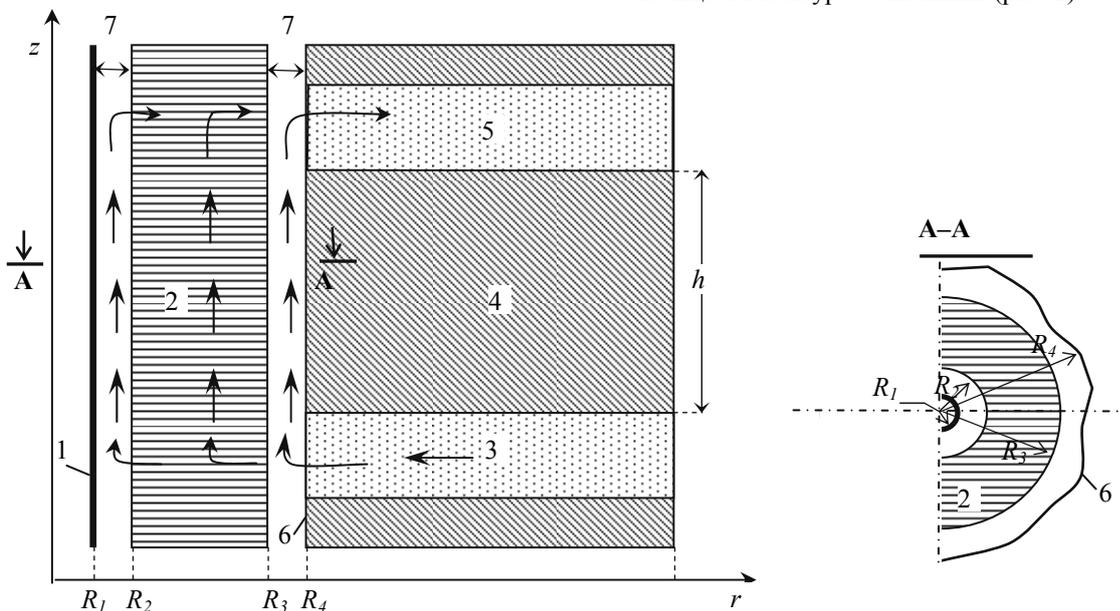


Рис. 2. Схема межпластового заколонного перетока газа из водоносного газохранилища: 1 – обсадная колонна; 2 – цементное кольцо; 3 – пласт-коллектор; 4 – водоупор; 5 – пласт, расположенный над крышкой хранилища (поглощающий); 6 – породный контур скважины; 7 – кольцевой зазор

Для оценки утечек газа в заколонном пространстве воспользуемся формулами:

– на контактах обсадная колонна-цемент, цемент-порода

$$Q_1 = \frac{\kappa_k \cdot F_1 \cdot (P_1^2 - P_2^2)}{2P_0 \cdot \mu_e \cdot h};$$

– в пористой среде цементного камня

$$Q_2 = \frac{\kappa_y \cdot F_2 \cdot (P_1^2 - P_2^2)}{2P_0 \cdot \mu_z \cdot h},$$

где  $\kappa_k$  – эффективная проницаемость кольцевых каналов

$$\kappa_k = 8,4 \cdot 10^{-6} \omega^2; \omega = R_2 - R_1; \omega = R_4 - R_3;$$

$F_1, F_2$  – площади поперечных сечений проводящих путей

$$F_1 = \pi(R_2^2 - R_1^2); F_1 = \pi(R_4^2 - R_3^2);$$

$$F_2 = \pi(R_3^2 - R_2^2),$$

$R_1, R_2, R_3, R_4$  – соответственно, радиус обсадной колонны, цементного кольца (внутренний и внешний) и породного контура скважины;  $P_1, P_2$  – давление в коллекторе и в проницаемом пласте, залегающем над водоупором;  $P_0$  – атмосферное давление;  $\mu_z$  – вязкость газа;  $h$  – мощность водоупора;  $\kappa_y$  – проницаемость цементного камня.

Оценки интенсивности перетока газа по заколонному пространству, применительно к горно-геологическим условиям Левенцовской структуры ( $P_1 = 1$  МПа;  $h = 100$  м;  $P_0 = 0,1033$  МПа;  $\kappa_y = 5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $\mu_z = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ), были выполнены в программной среде MathCad и приведены на рис. 3–4.

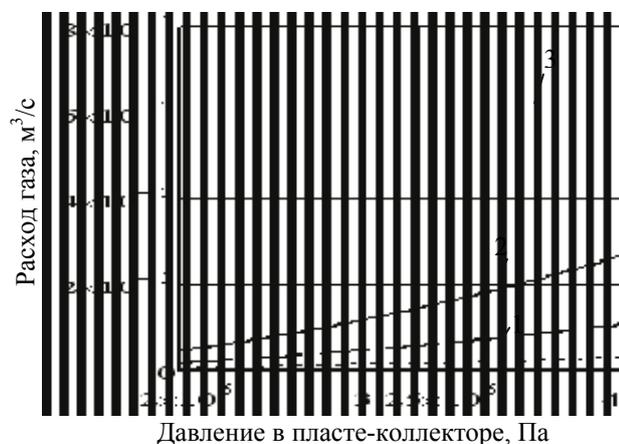


Рис. 3. Интенсивность перетока газа из пласта-коллектора через кольцевые каналы заколонного пространства: 1, 2, 3 – при размере кольцевых зазоров  $2 \cdot 10^{-3}$ ;  $3 \cdot 10^{-3}$  и  $4 \cdot 10^{-3}$  м соответственно (диапазон изменения величин принят в соответствии с работой [7])

Анализ графиков на рис. 3–4 показывает, что утечки газа из пласта-коллектора через цементное кольцо равны  $4 \div 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , а в пределах кольцевых каналов доходят до  $1 \div 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом их максимальные величины соответствуют периодам нагнетания газа в хранилище ( $P_1=5-7$  МПа), а минимальные – периодам хранения и отбора газа ( $P_1=2,5$  МПа).

Суммарный переток газа по заколонному пространству при закачке достигает  $605,9 \text{ м}^3/\text{сут}$ , в остальное время составляет  $121,1 \text{ м}^3/\text{сут}$ , что дает общий годовой объем потерь, равный  $103,34$  тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$  или  $0,07\%$  от активного объема хранимого газа.

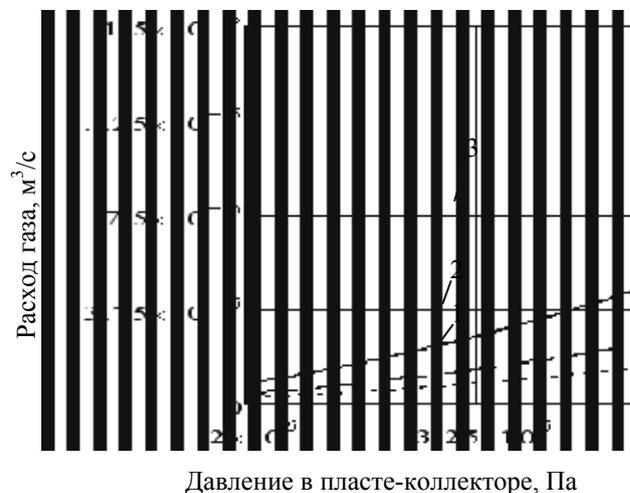


Рис. 4. Интенсивность перетока газа из пласта-коллектора через пористую среду цементного камня заколонного пространства: 1, 2, 3 – при толщине цементного кольца  $0,02$ ;  $0,03$  и  $0,05$  м соответственно

**Выводы.** На основании расчетов, выполненных для горно-геологических условий Левенцовской структуры, с учетом влияния капиллярных сил и процессов диффузии на формирование внутрипластовых потерь газа, установлено, что объем газа, мигрировавшего за пределы ПХГ, составляет  $1,76\%$  от активного объема газа в хранилище.

Показана необходимость закачки газа в нижнюю часть пласта-коллектора, что позволит уменьшить влияние гравитационного эффекта и увеличить полезный объем хранилища. Для интенсификации вытеснения жидкости газом предложено использование ПАВ, целесообразность применения которых в конкретных условиях необходимо установить путем опытной закачки химических реагентов в пласт.

Установлено, что суммарные безвозвратные потери, вызванные растворением газа, его перетоком через кровлю коллектора и заколонное пространство скважины, на всех этапах эксплуатации хранилища не превысят  $4\%$  объема аккумулируемого газа. Такой объем потерь, сопоставимый с мировым опытом эксплуатации водоносных хранилищ, является приемлемым и свидетельствует о технико-экономической целесообразности подземного хранения газа в данной геологической структуре.

**Список литературы / References**

1. Солдаткин С.Г. Методы контроля герметичности подземных хранилищ газа. Обз. информ. / С.Г. Солдаткин // Сер. Транспорт и подземное хранение газа – М.: ИРЦ Газпром, 2000. – 37 с.

Soldatkin, S.H. (2000), *Metody kontrolya germetichnosti khranilishch gaza* [Methods to Control Leakage of Underground Gas Storage], Series Transport and underground gas storage, Gazprom, Moscow, Russia.

2. Садовенко І.А. Газодинамическая оценка параметров хранения газа в водоносном горизонте / Садовенко І.А., Рудаков Д.В., Инкин А.В. // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов ИГТМ Украины. – 2010. – Вып.91. – С.77–84.

Sadovenko, I.O., Rydakov, D.V. and Inkin, O.V. (2010), “Gas-dynamic estimation of parameters of gas storage in aquiferous horizon”, *Geotechnical mechanics: Interdepartmental collection of scientific works of IGTM of Ukraine*, no.91, pp.77–84.

3. Лурье М.В. Механика подземного хранения газа в водоносных пластах / М.В. Лурье– М.: Нефть и газ, 2001. – 350 с.

Lyrye, M.V. (2001), *Mekhanika podzemnogo khraneniya gaza v vodonosnix plastakh* [The Mechanics of Underground Gas Storage in Aquifers], Neft i haz, Moscow, Russia.

4. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде под давлением / А.Ю. Намиот, М.М. Бондарева. – М.: Гостоптехиздат, 1993. – 145 с.

Namiot, A.Yu. and Bondareva, M.M. (1993), *Rastvorimost gazov v vode pod davleniem* [Solubility of Gases in Water Under Pressure], Gostoptekhizdat, Moscow, Russia.

5. Лурье М.В. Естественная убыль природного газа в подземных хранилищах, создаваемых в водоносных пластах / Лурье М.В., Дидковская А.С., Яковлева Н.Н. // НТС „Транспорт и подземное хранение газа“ – М.: ООО „ИРЦ Газпром“, 2003. – №6. – С. 21–31.

Lyrye, M.V., Didkovskaya, A.S. and Yakovleva, N.N. (2003), “Natural loss of natural gas in underground storage facilities set up in aquifers”, *Transport i podzemnoye khraneniye gaza*, *Scientific-and-technical collected articles*, no.6, pp. 21–31.

6. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика / И.А. Чарный– М.: Гостоптехиздат, 1993. – 396 с.

Charnyi, I.O. (1993), *Podzemnaya gidrogazodynamika* [Underground Hydro-Gas Dynamics], Gostoptekhizdat, Moscow, Russia.

7. Техніка та технологія буріння гідрогеологічних свердловин [Текст]; підручник для студ. спец. з напрямку 0707 „Геологія“ / М.А. Дудля, І.О. Садовенко; під ред. Г.Г. Півняка // Національний гірничий ун-т. – Дніпропетровськ, 2007. – 399 с.

Pivnyak, G.G., Dydlia, M.O. and Sadovenko, I.O. (2007), *Tehnika i tehnologiya byrinya gidrogeologichnih sverdlovin* [Technique and Technology of Drilling Water Wells], high school textbook, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine.

**Мета.** Оцінка впливу капілярних сил, дифузії та гравітації на формування втрат газу в середині пластів при експлуатації водоносного газосховища.

**Методика.** Розроблено й застосовано методику, що ґрунтується на аналітичному моделюванні динаміки газоводяного контакту та розрахунку втрат газу за рахунок дифузії, розчинення й заколонного перетікання, яка дозволяє оцінити сумарні безповоротні втрати газу на всіх етапах роботи сховища. Верифі-

кацію моделі виконано для гірничо-геологічних умов Левенцівської структури Західного Донбасу.

**Результати.** Визначено форму газоводяного контакту залежно від його глибини та радіусу впродовж чотирьох тижнів після початку закачування газу у водоносний пласт. Втрати газу за один цикл роботи газосховища, за рахунок дифузії й розчинення, складуть 1,76% від його активного об'єму. Витоки газу із пласта-колектора через цементне кільце оцінюються в діапазоні  $4 \div 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , а в межах кільцевих каналів досягають  $1 \div 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . При цьому їх максимальні величини відповідають періодам нагнітання газу у сховище, а мінімальні – періодам зберігання та відбору газу. Сумарне перетікання газу по заколонному простору при закачуванні може перевищити  $600 \text{ м}^3/\text{добу}$ , а в решті часу складе близько  $120 \text{ м}^3/\text{добу}$ , що дає загальний річний об'єм втрат  $103,34 \text{ тис. м}^3/\text{рік}$  або  $0,07\%$  від активного об'єму газу, що зберігається.

**Наукова новизна.** Шляхом моделювання виконано оцінку впливу капілярних сил, процесів дифузії та гравітації на формування втрат газу всередині пластів на різних етапах експлуатації водоносного газосховища.

**Практична значимість.** Встановлено, що сумарні безповоротні втрати, викликані розчиненням газу, його перетіканням через покрівлю колектора й заколонний простір свердловини, не перевищують  $4\%$  об'єму газу, що акумулюється. Така величина втрат є допустимою з урахуванням світового досвіду роботи підземних газосховищ.

**Ключові слова:** водоносне газосховище, втрати газу, газоводяний контакт, дифузія, розчинення

**Purpose.** To assess the impact of capillary forces, diffusion and gravity on the formation of in-situ gas losses during the operation of the aquifer gas storage.

**Methodology.** A technique based on the analytical modeling of the dynamics of gas-contact, and the calculation of losses due to gas diffusion, dissolution and cross-flow casing has been developed and applied. It allows us to estimate the total irretrievable loss of gas at the all stages of storage. Verification of the model has been done for the mining and geological conditions of Leventsovskaya structure of the Western Donetsk Basin.

**Findings.** We specified the form of gas-water contact depending on the depth and the radius within four weeks after the start of gas injection into the aquifer. The loss of gas during one working cycle of the gas storage facility due to diffusion and dissolution constitute  $1.76\%$  of its active volume. Leakage of gas from the reservoir through the cement ring is estimated in the range  $4 \div 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{s}$ , and within the annular channel reaches  $1 \div 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{s}$ . Its maximum values correspond to the periods of pumping of the gas in the storage and minimum values correspond to the periods of storage and gas extraction. The total flow of gas through the casing annulus during pumping can exceed  $600 \text{ м}^3/\text{day}$ , the rest of the time it makes about  $120 \text{ м}^3/\text{day}$ , which gives the total annual loss of  $103.34 \text{ thousand м}^3/\text{year}$  or  $0.07\%$  of the active volume of stored gas.

**Originality.** By means of modeling the influence of capillary forces, diffusion and gravity on the formation of

in-situ gas losses at various stages of exploitation of the aquifer gas storage has been estimated.

**Practical value.** We have found out that the total irretrievable loss caused by the dissolution of the gas, its flow through the collector and the roof space of the well casing does not exceed 4% of the accumulated gas. This

amount of loss is acceptable, taking into account the world experience of underground storage facilities.

**Keywords:** *aquifer storage facility, loss of gas, gas-water contact, diffusion, dissolution*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Бузилом. Дата надходження рукопису 08.06.12.*

УДК 622.235.361

Э.И. Ефремов<sup>1</sup>, член-кор. НАН Украины,  
д-р техн. наук, проф.,  
К.С. Ищенко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,  
И.Л. Кратковский<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
ст. научн. сотр.,  
А.С. Баскевич<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.

1 – Институт геотехнической механики  
им. Н.С. Полякова НАН Украины, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: ishenko\_k@i.ua

2 – Государственное высшее учебное заведение  
„Украинский государственный химико-технологический  
университет“, г. Днепропетровск, Украина

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРОД РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА

E.I. Yefremov<sup>1</sup>, Corresponding member of National Academy of Science of Ukraine, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
K.S. Ishchenko<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Tech.),  
Senior Research Fellow,  
I.L. Kratkovsky<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Tech.),  
Senior Research Fellow,  
A.S. Baskevich<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Phys.-Math.),  
Senior Research Fellow

1 – N.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics  
of National Academy of Science of Ukraine, Dnepropetrovsk,  
Ukraine, e-mail: ishenko\_k@i.ua

2 – State Higher Educational Institution “Ukrainian State  
University of Chemical Technology”, Dnepropetrovsk, Ukraine

## INFLUENCE OF DYNAMIC LOADING ON STRUCTURAL CHANGE IN THE ROCKS OF DIFFERENT GENESIS

**Цель.** Исследование характера разрушения полиминеральных горных пород различного генезиса для создания ресурсо- и энергосберегающих способов их добычи.

**Методика.** В лабораторных и полигонных условиях, с помощью рентгеновской установки ДРОН-3, поляризационного микроскопа МП-2, снабженного интегратором ИСА, изучены структурные изменения в полиминеральных породах различного генезиса, подвергнутых действию динамических нагрузок различной интенсивности (высокоскоростная центробежная ударная установка, взрывное разрушение моделей).

**Результаты.** Приведены результаты гранулометрического и рентгеноструктурного анализов мелкодисперсных фракций пород магматического, метаморфического и осадочного генезиса, разрушенных динамическими нагрузками.

**Научная новизна.** При изучении мелкодисперсных фракций осадочных, метаморфических и метасоматически измененных гранитов светооптическим и рентгеноструктурным методами установлена аналогия в характере разрушения пород различного генезиса при их ударном и взрывном нагружении. В составе мелкодисперсных фракций разрушенных пород преобладают мельчайшие обломки зерен минералов с наибольшей плотностью дефектов строения. Для песчаников и железистых кварцитов таким минералом является кварц; при воздействии на метасоматические граниты взрывных нагрузок в составе частиц фракции 0–100 мкм обломки альбита и кальцита доминируют над частицами кварца. В рентгеновском спектре гранитов появляются линии, характерные для урансодержащих минералов.

**Практическая значимость.** Выполненные исследования позволяют разработать ресурсо- и энергосберегающие способы добычи и последующей переработки минерального сырья.

**Ключевые слова:** *удар, взрыв, полиминеральные породы, мелкодисперсные частицы, гранулометрия, рентгеноструктурный анализ*

**Введение.** Процесс динамического разрушения анизотропных полиминеральных горных пород, отличающихся наличием большого количества дефектов их внутреннего строения в виде межзерновых

контактов, слагающих породу минералов, интрагранулярных микротрещин и плоскостей спайности, в настоящее время недостаточно исследован. Применяемые методы динамического разрушения таких пород должны обеспечивать не только необходимое дробление и гранулометрический состав горной мас-

© Ефремов Э.И., Ищенко К.С., Кратковский И.Л., Баскевич А.С., 2012