

И.А. Садовенко, д-р техн. наук, проф.,  
Д.В. Рудаков, д-р техн. наук,  
А.В. Инкин, канд. техн. наук  
(НГУ)

## ГАЗОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ХРАНЕНИЯ ГАЗА В ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ

Досліджена можливість створення водоносного газосховища в геологічній структурі, розташованій в центральній частині України. Виконана балансова оцінка заповнення сховища з урахуванням витоків газу через породи покрівлі в період закачування, зберігання і витягу газу. Проведеними розрахунками встановлені зміни об'єму і тиску газу у водоносному пласті на всіх етапах експлуатації сховища.

## GAS- AND HYDRODYNAMICAL ASSESSMENT FOR PARAMETERS OF UNDERGROUND GAS STORAGE IN THE AQUIFER

A feasibility study was accomplished for a geological structure in Central Ukraine as the hypothetical underground gas storage (UGS) facilities. The balance estimation was made for UGS performance taking into account the gas losses caused by leakage through a low-permeable overlying bed during pumping, storing gas, and its extraction. The calculations were carried out for changes of the gas volume and pressure in the aquifer during all stages of exploitation of UGS facilities.

**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. м<sup>3</sup>), Канаде (30 хранилищ – 25 млрд. м<sup>3</sup>), России (10 хранилищ – 25 млрд. м<sup>3</sup>), Франции (3 хранилища – 1,5 млрд. м<sup>3</sup>) и в других странах. Анализ их работы показал [2], что средние удельные затраты на прирост 1 тыс. м<sup>3</sup> активного объема газа 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 высокой герметичностью, благодаря чему они также могут использоваться для хранения парниковых газов, например, СО<sub>2</sub>.

В Украине поиск геологических структур, пригодных для хранения газа, приобретает особую актуальность. 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. м<sup>3</sup> позволяет сглаживать лишь суточные колебания потребления, в то время как сезонные пики достигают сотен миллионов куб. 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.

**Геологическая характеристика участка.** В качестве емкостного ресурса, способного вмещать запасы природного газа, необходимые для покрытия се-

зонной неравномерности газопотребления в центральной части Украины, может быть использовано поровое пространство пермско-триасового водоносного горизонта, расположенного в пределах Левенцовской площади (1930 км<sup>2</sup>) Западного Донбасса (рис. 1).

Мощность пласта-коллектора изменяется от 113 до 127 м при глубине залегания кровли от 350 до 580 м. Воды горизонта характеризуются высокой минерализацией (33-65г/л) и не пригодны для любого вида водоснабжения. Пласт обладает достаточной проницаемостью при средних значениях коэффициента фильтрации 3 м/сут и водопроницаемости 290 м<sup>2</sup>/сут, коэффициента пьезопроводности и активной пористости от 0.1 до 0.25. Перспективность выделенных песчаников как коллектора также подтверждается наличием верхнего водоупора, представленного 110 – 200 метровой толщиной юрских глин с коэффициентом фильтрации 10<sup>-4</sup> м/сут.

Целью данной работы является оценка геотехнологических параметров подземного хранения газа в пермско-триасовых отложениях на территории Левенцовской площади. Для этого потребовался комплексный анализ гидродинамических и геомеханических процессов с точки зрения устойчивого функционирования и экологической безопасности ПХГ.

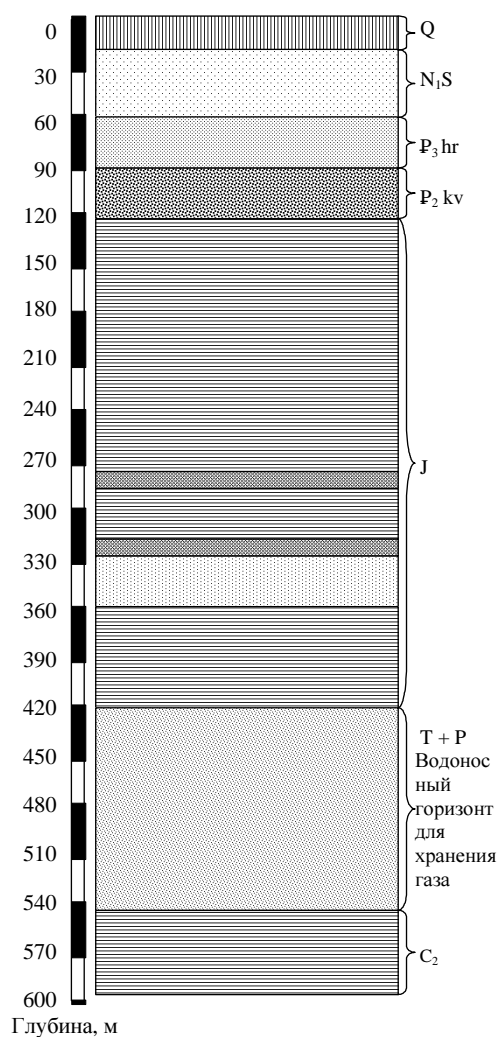


Рис. 1 – Сводный геологический разрез Левенцовской площади

**Схематизация ПХГ в водоносном горизонте.** С учетом сезонных изменений потребления газа следует выделить такие этапы функционирования ПХГ: 1) закачка газа в теплое время года; 2) хранение закачанного газа; 3) отбор газа в зимний период; 4) хранение т.н. буферного или технологического газа до следующей закачки. В течение от нескольких суток до нескольких недель по окончании каждого периода в пласте-коллекторе происходит стабилизация и перераспределение давления газа. Его пространственно-временные изменения могут быть детально промоделированы на основании системы уравнений двухфазной фильтрации [3-6]. Однако для предварительных оценок осуществимости проекта ПГХ достаточно определить предельные диапазоны таких геотехнологических параметров, как размеры газовой полости, давления в ней, объемов хранимого газа и утечек [7]. Необходимые расчеты выполнены на основании гидрогеологических данных и соотношений подземной гидрогазодинамики.

Для горно-геологических условий Левенцовской площади применима схема пласта-коллектора, перекрытого сверху и снизу горизонтальными слабопроницаемыми отложениями (рис. 2). Газовая полость приближенно принимает форму цилиндра, радиус которого при закачке и отборе изменяется от  $R_{min}$  до  $R_{max}$ . Более точно форма образующейся полости похожа на усеченный конус, расширенный кверху из-за разницы плотностей газа и воды.

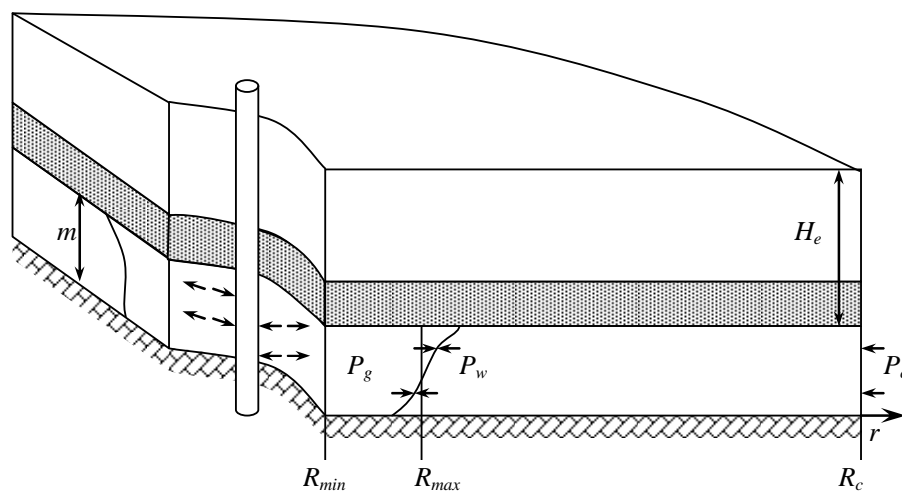


Рис. 2 – Схема ПГХ в горизонтальном водоносном пласте

Отклонение формы газовой полости от цилиндрической можно оценить, учитывая гидростатическое давление, оказываемое на элементарные цилиндры газа единичной высоты, расположенные в кровле и на подошве пласта. Для изолированных объемов отношение нижнего радиуса к верхнему записывается в виде  $\sqrt{H_e / (H_e + m)}$ , где  $H_e$  – напор в водоносном пласте, а  $m$  мощность пласта. Применительно к условиям пермско-триасового горизонта на территории Левенцовской площади ( $H_e=200$  м,  $m=120$  м) данная величина составит 0,79. Однако для сообщающихся объемов газа с незначительным перепадом давления эта величина будет близкой к 1,0. Более точно форма газо-водяного контак-

та может быть определена численным моделированием с заданием условия Кельвина на фазовой границе [8].

Давление в газовой полости в стационарных условиях должно уравновешиваться давлением водяного столба, которое усредняется по мощности пласта

$$P_g = P_c = \frac{1}{m} \int_0^m \rho_w g z dz + \rho_w g H_e = \rho_w g \left( H_e + \frac{m}{2} \right), \quad (1)$$

где  $\rho_w$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $z$  – вертикальная координата.

Объем сжатого газа в пласте определяется в соответствии с законом Бойля-Мариотта

$$V_g = V_0 P_g / P_a, \quad (2)$$

где  $V_0$  – объем закачанного газа при нормальных условиях;  $P_a$  – атмосферное давление;  $P_g$  – давление газа в пласте.

Радиус цилиндрической области в пласте вокруг скважины определяется в виде

$$R_g = \sqrt{V_0 / (\pi m n_a)}, \quad (3)$$

где  $n_a$  – активная пористость пород пласта.

**Расчетная оценка параметров ПХГ.** В случае размещения в Левенцовской структуре подземного хранилища рабочим объемом 150 млн. м<sup>3</sup> и эквивалентным объемом буферного газа горизонтальные размеры полости, заполненной газом, будут изменяться от 400 до 1100 м (табл. 1).

Объем, необходимый для хранения 300 млн. м<sup>3</sup> газа, не превышает полезную упругость пласта-коллектора, определенную в ходе опытно-фильтрационных работ 17,5 млн. м<sup>3</sup>.

Давление в ПХГ в период нагнетания изменяется от  $P_w$  (давление в скважине) до  $P_{g, \min}$  (давление на границе фаз), причем  $P_{g, \min} > P_c$ , что обуславливает расширение области, занимаемой газом. Давление в скважине должно в 2-3 раза превышать давление в пласте, что для рассматриваемых условий дает  $P_w = 5-7$  МПа. В период хранения, до и после закачки давление  $P_g$ , определяемое по формуле (1), составляет 2,6 МПа. В период отбора оно должно быть несколько меньше, чем давление в откачивающей скважине для поддержания стабильного расхода.

Таблица 1 – Оцениваемые радиусы газовой полости в Левенцовской структуре и объемы занимаемые газом

Параметры	$R_{min}$ , м	$R_{min}$ , м
$n_{a, \min} = 0,1$	400	565
$n_{a, \max} = 0,25$	253	375
$V_g$ , млн. м <sup>3</sup>	5,77	11,54

Утечки газа из ПГХ обусловлены его фильтрацией через залегающую сверху водонасыщенную толщу и затрубное пространство скважины, а также растворением в воде. Интенсивность утечек была рассчитана для следующего типового графика работы водоносного газохранилища:

- $t_1=122$  дня закачки (1 июня – 30 сентября, 200 млн. м<sup>3</sup>),
- $t_2=61$  сут хранения (1 октября – 30 ноября),
- $t_3=90$  сут отбора (1 декабря – 28 февраля, 200 млн. м<sup>3</sup>),
- $t_4=92$  сут хранения буферного газа (1 марта – 31 мая).

Утечки газа через затрубное пространство скважин могут быть рассчитаны по формуле

$$Q_p = \frac{\kappa_p S_p}{\mu_g H_e} \frac{P_{g,w}^2 - P_a^2}{2P_a} \quad (4)$$

где  $\kappa_p$  и  $S_p$  – проницаемость и площадь затрубного пространства,  $\kappa_p = 8,4 \cdot 10^{-6} \omega_p^2$ ,  $\omega_p$  – ширина сечения. Величину  $S_p$  можно определить как площадь кольцевого зазора шириной  $\omega_p$  вокруг скважины наружного радиуса  $r$  [9].

В период нагнетания  $P_{g,w}=P_w$ , в остальное время  $P_{g,w}=P_g$ , где  $P_g$  определяется по формуле (1). Расчеты показали, что интенсивность утечек при закачке достигает 581,9 м<sup>3</sup>/сут, в остальное время составляет 151,4 м<sup>3</sup>/сут, что дает общий объем потерь 107,8 тыс. м<sup>3</sup>/год или 0,07% от среднего объема хранимого газа (150 млн. м<sup>3</sup>). Такие потери допустимы [1].

Объемный расход потерь газа через кровлю ПГХ на этапе закачки рассчитывается с учетом неравномерности давления в пласте и увеличения площади хранилища в плане

$$Q_1(t) = 2\pi \int_0^{R_g(t)} v_g(r,t) r dr, \quad (5)$$

где скорость фильтрации газа  $v_g$  через слой водонасыщенных глин мощностью  $L_c$  над кровлей пласта-коллектора определяется из выражения

$$v_g = \frac{\kappa_c}{\mu_g L_c} (P_g - P_a) \quad (6)$$

где  $\kappa_c$  – проницаемость глин.

Для этапа нагнетания газа допустимо принять квазистационарное распределение давления в области  $r_w < r < R_g$ .

$$P_g(r) = \sqrt{P_w^2 + (P_{g,b}^2 - P_w^2) \frac{\ln(r/r_w)}{\ln(R_g/r_w)}} \quad (7)$$

Радиус области, занимаемой газом, можно приближенно оценить по закачиваемому объему и соответствующему увеличению площади газовой полости. Пренебрежение упругими эффектами при вытеснении воды дает несколько завышенную оценку  $Q_1$  из-за большего, чем в действительности, радиуса  $R_g$ .

Этап хранения закачанного газа можно условно разделить на два периода: а) стабилизации давления и объемов газовой фазы; б) квазистационарного динамического равновесия. Продолжительность первого периода после завершения закачки можно оценить по критерию Фурье линеаризованного уравнения фильтрации газа

$$Fo = \frac{at}{l^2}, \quad a = \frac{\bar{P}_g \kappa_{aq}}{\mu_g n_a}, \quad (8)$$

где  $\kappa_{aq}$  – проницаемость пласта,  $\mu_g$  – вязкость газа,  $\bar{P}_g$  – среднее давление в газовой полости;  $l$  – характерный горизонтальный размер области (например, радиус  $R_g$ ). При  $Fo > 1$  происходит практически полная стабилизация процесса.

В качестве среднего значения давления в полости при его неравномерном распределении по логарифмической зависимости (8) уместно взять среднее гармоническое или среднее геометрическое между  $P_c$  и  $P_w$ . Эти средние значения составляют 3,42 и 3,6 МПа, поэтому можно принять  $\bar{P}_g = 3,5$  МПа. Тогда,  $a = 0,7$  м<sup>2</sup>/с для  $n_a = 0,25$  и  $a = 1,75$  м<sup>2</sup>/с для  $n_a = 0,1$ . Таким образом, стабилизация наступит спустя небольшой промежуток времени  $t_{2a} \cong 2,1$  сут для обоих значений  $n_a$ .

Интенсивность утечек в этот период можно определить по формуле

$$Q_{2,1}(t) = \pi R_{\max}^2 v_g(t) \quad (9)$$

где скорость фильтрации газа вверх вычисляется по формуле (6) с учетом изменения давления от  $\bar{P}_g$  до  $P_c$ .

В оставшееся до отбора время интенсивность утечек определяется по формулам (6) и (9) при постоянной скорости  $v_g$ , вычисленной при постоянном давлении в полости. Такой подход допустим, поскольку уменьшение объема газа будет компенсироваться водой в условиях газогидростатического равновесия.

При отборе газа необходимо поддерживать практически постоянный расход, близкий к среднестатическому значению  $Q_3 \approx V_0/t_3$ . Соответствующее давление  $P_w$  на отбирающей скважине можно оценить на основании формулы притока газа к скважине в стационарном радиальном потоке

$$Q_{st} = \frac{\pi \kappa m}{\mu_g} \frac{\bar{P}_g^2 - P_w^2}{P_a \ln(R_g/r_w)}, \quad (10)$$

где  $R$  – радиус области, занятой газом. Из условия  $Q_3 \approx Q_{st}$  при  $R_{min} < R_g < R_{max}$  получим, что разность давлений  $\Delta P = \bar{P}_g - P_w$  должна быть в пределах 9-10 кПа. Это означает, что в рассматриваемом режиме отбора и последующего хранения оставшегося газа его давление будет близко к эквивалентному гидростатическому  $P_c$ .

Сокращение горизонтальных размеров газовой полости будет происходить значительно медленнее по сравнению с ее расширением на этапе закачки, что объясняется малым градиентом давлений. Кроме того, основное понижение давления в этот момент приурочено к центральной части газовой области, а не к периферии, где газ вытесняется водой.

Скорость фильтрации газа через вышележащий водоупор на этапе отбора и до закачки рассчитывается по формуле (6), а площадь, через которую фильтруется газ в течение этих этапов, уменьшается от  $\pi R_{max}^2 / n_a$  до  $\pi R_{min}^2 / n_a$ .

Поскольку фильтрация газа протекает на границе раздела фаз, то в уравнении (6) необходимо учитывать относительную фазовую проницаемость. Это соответствует уменьшению параметра  $k$  приблизительно в 10-12 раз. Поэтому при расчетах вместо  $k_c = 10^{-16} \text{ м}^2$  использовалось значение  $10^{-17} \text{ м}^2$ .

При выполнении расчетов предполагалось, что утечки не оказывают существенного влияния на распределение давления газа в ПГХ. Результаты расчетов утечек при минимальном и максимальных значениях активной пористости приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Оцениваемые потери газа в течение одного года эксплуатации ПГХ на территории Левенцовской структуры

Период	Продолжительность		$Q_1$ , млн. м <sup>3</sup>		$Q_2$ , млн. м <sup>3</sup>	
	мес.	сут	всего	за месяц	всего	за месяц
1) закачка	4	122	1,31	0,328	0,52	0,13
2) хранение	2	61	0,81	0,405	0,32	0,16
3) отбор	3	90	1,19	0,396	0,48	0,16
4) хранение буферного газа	3	92	0,91	0,303	0,37	0,123
1 – 4 (всего)	12	365	4,22	0,352	1,69	0,141

$Q_1$  рассчитан при  $n_{a, min}$ ,  $Q_2 - n_{a, max}$

Эксплуатация ПГХ может привести к вытеснению некоторого объема воды на границе рассматриваемого пласта. Объем активных пор в пласте в пределах геологических границ Левенцовской структуры радиусом 25 км оценивается в  $2,36 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$ . Максимальный объем газохранилища составляет 11,54 млн. м<sup>3</sup> или 0,05% объема пор пласта. Добавление такого объема в пласт может вызвать смещение стационарной границы раздела соленых и пресных вод на фронте фильтрации 10-20 км на 5-10 м. Такое продвижение ввиду своей незначительности не приведет к ухудшению качества воды, отбираемой близлежащими водозаборами из продуктивных горизонтов.

Оценка напряженно-деформированного состояния горного массива при аккумуляции газа в водоносном пласте со схожими гидрогеологическими условиями была выполнена в работе [10]. На основании математического моделирования и стабилметрических испытаний было установлено, что в процессе закачки и отбора газа возникающие в пласте-коллекторе напряжения приводят к изменению его физико-механических свойств. В диапазоне давлений, принятом для условий ПХГ на территории Левенцовской площади, установлено увеличение объема водоносного пласта на 4%, его пористости на 1% и проницаемости на 4%, что приведет к повышению эффективной ёмкости хранилища. При этом плотность пласта может уменьшиться на 2%, а адсорбционная активность пород снизится на 1%. Данные результаты позволят более точно учитывать изменения фильтрационных свойств пластов-коллекторов при расчетах эксплуатируемых водоносных газохранилищ.

**Выводы.** Проведенные расчеты показывают, что безвозвратные утечки газа в горно-геологических условиях Левенцовской площади на всех этапах эксплуатации хранилища не превысят 3% объема аккумулируемого газа. Такой объем потерь в сравнении с мировым научно-практическим опытом работы водоносных хранилищ является приемлемым и свидетельствует о технико-экономической целесообразности подземного хранения газа в данной геологической структуре. Обоснованный расчетным путем рабочий объем хранилища в 150 млн. м<sup>3</sup> позволит частично сглаживать сезонную неравномерность газопотребления в центральной Украине, не ухудшая при этом качество подземных вод в ближайших водозаборах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

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: – Автореферат дис. ... канд. экон. наук: – М., 2002. – 28 с.
3. Collins E. (1961) Flow of Fluids through Porous Materials. Reynold, New York.
4. Bear J., Zaslavsky D., Irmay S. (1968) Physical principles of water percolation and seepage. UNESCO. Paris.
5. Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика.– М.: Недра. – 1972.
6. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. – М.: Гостоптехиздат. – 1963.
7. Инкин А.В. Гидродинамическая модель газохранилища в водоносных пластах Кривбасса // Сб. научн. тр. НГУ. – 2010. – № 34, Т. 2, – С. 216-221.
8. Лурье М.В. Механика подземного хранения газа в водоносных пластах. – М.: Нефть и газ. – 2001.
9. Виноградов К.В. Термические исследования скважин для оценки утечек и перетоков газа при его подземном хранении. – Диссертация ... канд. техн. наук: – М., 1983.
10. Садовенко И.А., Инкин А.В. Динамика гидромеханических процессов пласта-коллектора водоносного газохранилища // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 6. – С. 25-28.