

УДК 622.276.279:691.4

МЕХАНИКА  
Н.В.Пирумян,  
А.А.Казарян,  
М.Г.Стакян**ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПОРОДНОГО МАССИВА В ЗОНЕ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА**

*Рассмотрено напряженно-деформированное состояние подземных пластов каменной соли, где расположены резервуары подземных хранилищ газа (ПХГ), с целью оценки надежности эксплуатации ПХГ. Для прочностных расчетов пород приняты реологическая модель Друккера-Прагера и условие неподвижности солевых прослоек в зоне резервуара. Для определения напряжений и деформаций пород применен метод конечных элементов (МКЭ) и получены их значения, позволяющие для интервала давлений  $p=2,5...15,2$  МПа в заданном сроке службы ПХГ обеспечить безопасность его эксплуатации.*

**Ключевые слова:** подземное хранилище газа (ПХГ), подземные пласты каменной соли, напряжения и деформации пластов, прочность пород, эксплуатация ПХГ

**Математическая модель поведения массива в зоне влияния выработки-емкости**

Подземный резервуар станции подземного хранилища газа (СПХГ), оборудованный составной основной обсадной колонной  $\varnothing 299$  мм до глубины 792 м и занесенной новой основной обсадной (последней зацементированной) колонной  $\varnothing 219$  мм, спущенной до глубины 760,4 м, выдержал испытания на герметичность рассолом и природным газом [1, 2].

Соляной массив, вмещающий подземные выработки-емкости ПХГ, склонен к проявлению реологических свойств, поэтому при оценке его устойчивости и конвергенции выработок использовались уравнения упруго-вязко-пластической модели, в частности, модели Друккера-Прагера, включающие следующие параметры: модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , угол внутреннего трения породы  $\varphi$ , отношение пределов текучести при трехосном растяжении и сжатии  $K$  (при ползучести  $K=1$ ), угол дилатансии  $\psi$  и константы  $A$ ,  $m$ ,  $n$ , характеризующие ползучесть при различных уровнях напряжений.

Для описания процесса ползучести введено понятие эквивалентной поверхности ползучести (или изоповерхности ползучести), которая дает меру “интенсивности” ползучести. Она (кривая на плоскости  $p, q$ ) определялась как параллельная поверхность (кривая) к поверхности пластичности. Такое допущение вводится в связи с тем, что она должна совпасть с последней при достижении пластичности (рис. 1).

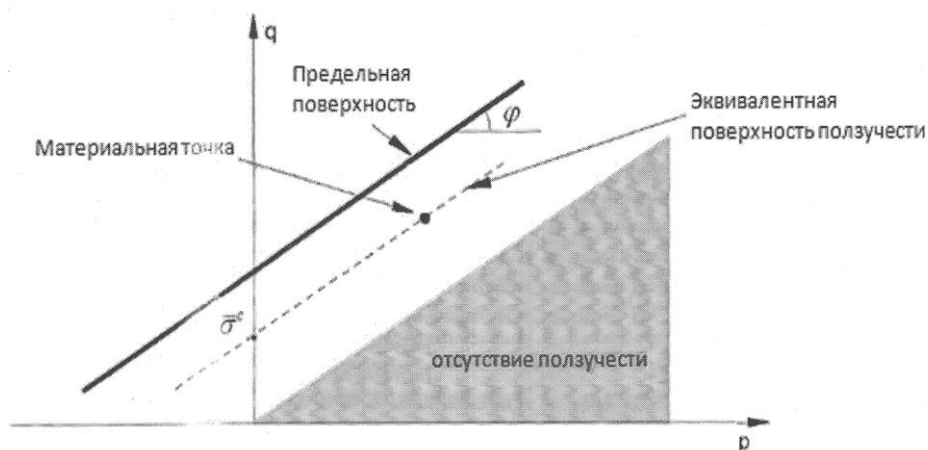


Рис. 1. Эквивалентное напряжение ползучести в терминах касательных напряжений

Согласно теории Друккера-Прагера, значение действующего напряжения  $\bar{\sigma}^C$  определяется по формуле

$$\bar{\sigma}^C = q - ptg\varphi, \quad (1)$$

где  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$  - разность главных напряжений;  $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  - среднее напряжение;  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  - главные действующие напряжения. Ползучесть начинается при  $\bar{\sigma}^C > 0$ .

Реологическая модель Друккера-Прагера имеет следующий вид:

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^C = A(\bar{\sigma}^C)^n t^m, \quad (2)$$

где  $\dot{\bar{\varepsilon}}^C$  - скорость деформации ползучести,  $c^{-1}$ ;  $\bar{\sigma}^C$  - действующее напряжение в процессе ползучести, МПа;  $t$  - время, с;  $A, n$  и  $m$  - параметры, определяемые из экспериментов на ползучесть в условиях трехосного сжатия.

С течением времени скорость деформации замедляется за один и тот же интервал времени  $[T_0, T_0 + \Delta T]$  накапливается деформация ползучести, равная

$$\Delta \bar{\varepsilon}^C = A(\bar{\sigma}^C)^n \frac{(T_0 + \Delta T)^{m+1} - T_0^{m+1}}{m+1} \approx A(\bar{\sigma}^C)^n T_0^m \Delta t. \quad (3)$$

Параметры уравнений определялись на основании обработки результатов прочностных и реологических испытаний образцов каменной соли в условиях трехосного сжатия.

#### Расчетная схема

Выбор интервала размещения проектируемого подземного резервуара осуществляется на основе обобщения требований действующих нормативных документов и анализа имеющихся сведений о геологическом строении рассматриваемой территории, его конструкции, конкретных условий залегания и свойствах горных пород, полученных ранее (таблица) [1].

Таблица

Сведения о подземном резервуаре

Глубина расположения, м			Длина необсаженной части скважины, м	Высота выработки-ёмкости, м
башмака последней зацементированной колонны	кровли выработки-ёмкости	подошвы выработки-ёмкости		
791,8	880	919,7	85,4	42,5

Устойчивость подземного резервуара оценивалась с учетом его циклической эксплуатации. Принятое в расчетах изменение давления на глубине башмака обсадной колонны в течение одного года представлено на рис. 2.

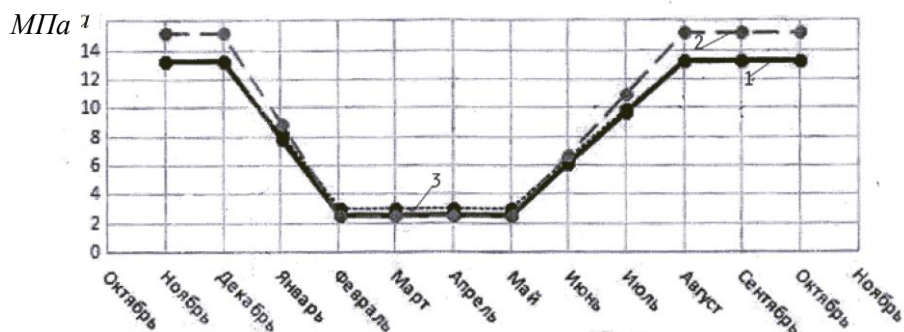


Рис. 2. Режимы циклической эксплуатации выработки-емкости (давления даны на уровне башмака последней зацементированной колонны): 1 – макс. 13,3 МПа, мин. 2,5 МПа; 2 – макс. 13,3 МПа, мин. 3 МПа; 3 – макс. 15,2 МПа, мин. 2,5 МПа

Для численного решения задачи рассматривался породный массив, в котором имеется выработка-емкость, расположенная на большом расстоянии от поверхности земли. Подземная выработка-емкость по виду формы, близкой к фигуре вращения контура подземного резервуара относительно оси скважины с отклонением максимальных значений ее радиуса от среднего не более 10 %, принималась осесимметричной (рис.3а).

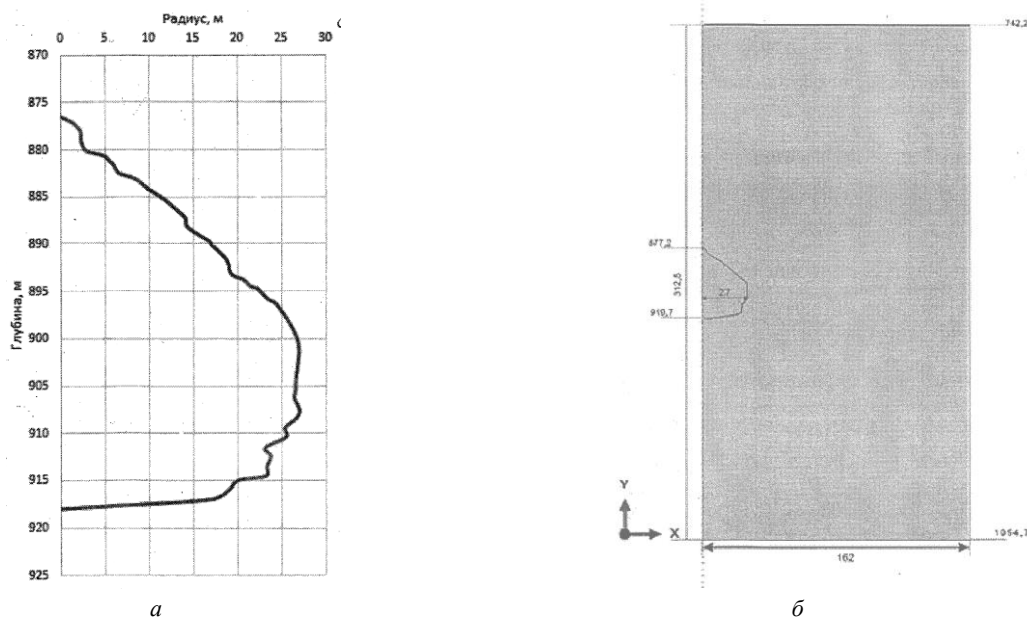


Рис. 3. Расчетная схема: а - половина сечения выработки-емкости; б -фрагмент массива горных пород с выработкой-емкостью

Рассматривается породный массив с половиной выработки. Максимальный полупролет выработки-емкости составляет 27м. Горизонтальные границы области располагаются на расстоянии  $2,5L_{max}$  от поверхности выработки-емкости, где  $L_{max}=54м$ . Вертикальные границы области располагаются на расстоянии  $3L$  от оси выработки - емкости. Вводится система координат  $x, y$  (рис. 3б), ось  $y$  направлена перпендикулярно поверхности земли. Массив моделируется в виде горизонтально слоистой толщи горных пород. Рабочая толща, в которой размещается подземный резервуар,

представлена массивом каменной соли с переслаиваниями аргиллитоподобных глин.

Прочностные характеристики глин, представленных в разрезе в виде пропластков мощностью до 3...5 м, не определялись, поскольку отобранный керновый материал не был пригодным для испытаний. Глинистые пропластки в рабочей толще нарушают однородность соляного массива. Так как напряженно-деформированное состояние массива столь сложного строения в отсутствие достоверной исходной информации определить невозможно, применяется модель однородного соляного массива. Чтобы как можно ближе подойти к реальным результатам при оценке устойчивости резервуара, параметры уравнения состояния принимаются из опытов при одноосном сжатии. В этих опытах предел длительной прочности значительно ниже (до 65%), чем в опытах при сложно-напряженном состоянии.

В расчетах принимаются следующие физико-механические свойства каменной соли: плотность -  $2150 \text{ кг/м}^3$ , модуль Юнга -  $1500 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона -  $0,3$ . Поскольку каменная соль проявляет ярко выраженные реологические и пластические свойства, модель также включает параметры, описывающие пластическое поведение (напряжение и соответствующие им пластические деформации будут равны  $2,24 \text{ МПа} - 0 \text{ д.е.}$ ;  $18 \text{ МПа} - 0,075 \text{ д.е.}$ ;  $22,7 \text{ МПа} - 0,12 \text{ д.е.}$ ). Реологические процессы, протекающие в каменной соли, учитываются с помощью коэффициентов  $A=1,67 \cdot 10^{-10}$ ,  $m = 0,896$ ,  $n = -0,689$ , входящих в уравнение состояния (2).

При численном решении задачи в окрестности подземного резервуара выделяется некоторая весомая область  $D$ , на границах которой заданы граничные условия, исключающие перемещения граней массива, параллельных плоскостям  $XU$  в направлении  $X$ , а также перемещение нижней границы массива, параллельной плоскости  $XU$  - вдоль оси  $Y$  (рис. 4).

Предполагается, что тектоническое поле напряжений отсутствует, а горное давление  $p_{гор}$  на выработку определяется только весом пород, лежащих выше выделенной области, и принимается в виде распределенной нагрузки. Это позволяет нормальные напряжения на верхней горизонтальной границе области определить как  $\sigma_n = \rho_r g H = 17,1 \text{ МПа}$  (рис. 4). Здесь  $\rho_r$  - осредненная плотность пород, залегающих выше;  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $H$  - глубина заложения верхней расчетной границы области,  $742,2 \text{ м}$ ;  $\sigma_n$  - нормальное напряжение,  $\text{МПа}$ , а  $p_a$  — противодействие в выработке,  $\text{МПа}$ , (рис. 4).

На поверхности выработки задается давление газа  $\sigma_n = -p_a$  (рис. 4).

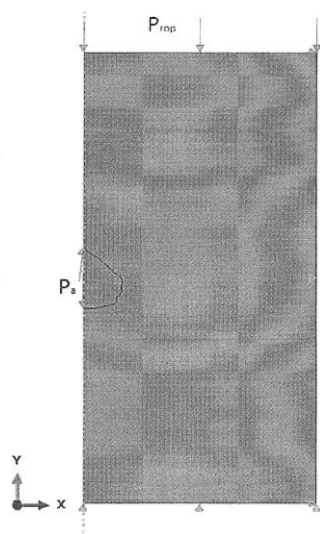


Рис. 4. Граничные условия и нагрузки

Оценка длительной устойчивости проектной выработки-емкости проводилась при циклическом режиме эксплуатации при следующих минимальном и максимальном давлениях газа в выработке-емкости:  $p_{\min} = 3 \text{ МПа}$ ,  $p_{\max} = 13,3 \text{ МПа}$ ,  $p_{\min} = 2,5 \text{ МПа}$ ,  $p_{\max} = 13,3 \text{ МПа}$  и  $p_{\min} = 2,5 \text{ МПа}$ ,  $p_{\max} = 15,2 \text{ МПа}$  (рис. 2). Максимальное эксплуатационное давление  $13,3 \text{ МПа}$  обосновано текущими возможностями компрессорной станции (максимальное возможное давление составляет  $12,5 \text{ МПа}$ ) и дополнительным давлением, возникающем за счет столба газа ( $0,8 \text{ МПа}$ ). По горно-геологическим условиям возможно увеличение максимального эксплуатационного давления до  $15,2 \text{ МПа}$  на отметке башмака последней зацементированной основной обсадной колонны, что на устье скважины составит  $14,3 \text{ МПа}$ . Далее расчеты с максимальным эксплуатационным давлением в подземном резервуаре, равном  $15,2 \text{ МПа}$ , приводятся к сведению. Минимальное эксплуатационное давление определялось из решения задачи устойчивости и эксплуатационной надежности подземного резервуара на весь срок эксплуатации.

По результатам расчета были получены распределения напряжений и деформаций в массиве. На рис.5 представлено изменение деформаций ползучести в кровле выработки-емкости при различных циклических режимах эксплуатации и их сравнение с критериальной кривой.

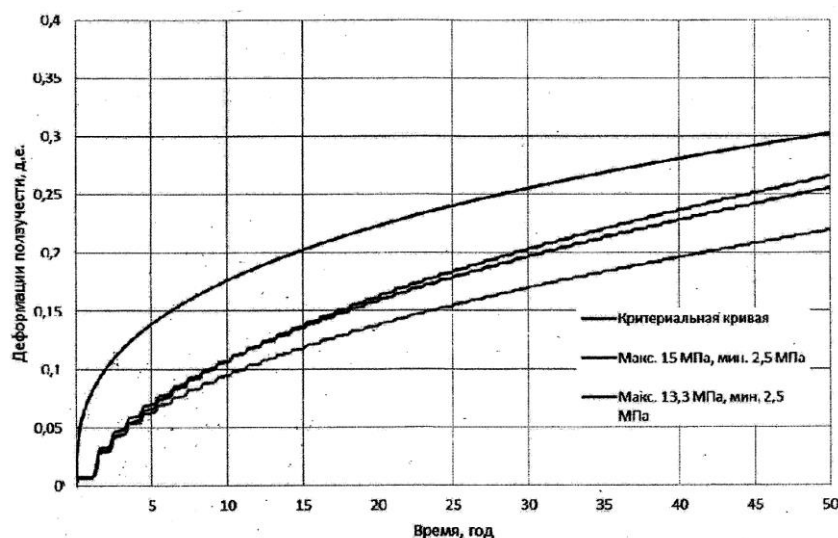


Рис. 5. Изменение деформаций ползучести в кровле выработки во времени

Сравнивая графики роста деформаций ползучести при различных режимах эксплуатации с критериальной кривой, можно сделать вывод, что при данных параметрах эксплуатации деформации ползучести в кровле выработки-емкости не превышают критические значения в течение эксплуатации и область запредельного деформирования (ОЗД) в окрестности кровли выработки-емкости не образуется. Результаты расчетов устойчивости выработки-емкости при различных режимах циклической эксплуатации представлены на рис. 6-8, где соответственно показаны распределение первоначального естественного поля напряжений, действующих напряжений и деформаций ползучести в окрестности выработки-емкости на момент окончания эксплуатации через 50 лет [3].

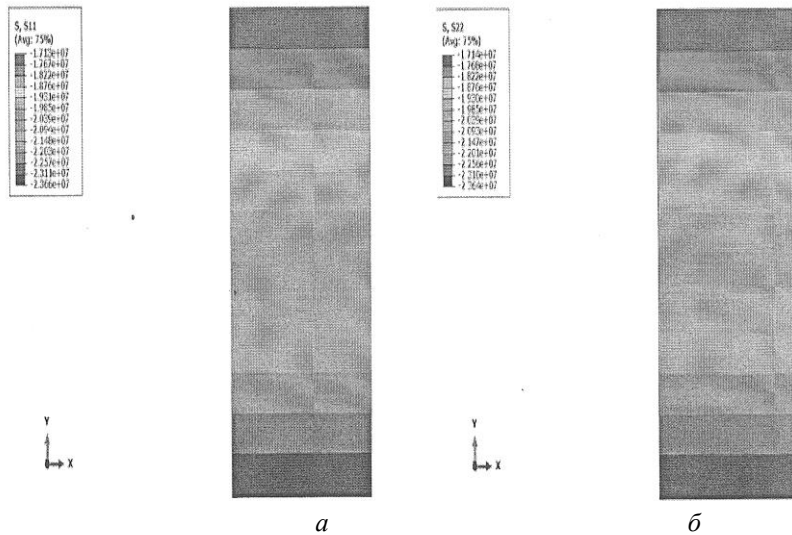


Рис. 6. Распределение естественных горизонтальных (а) и вертикальных (б) напряжений в массиве

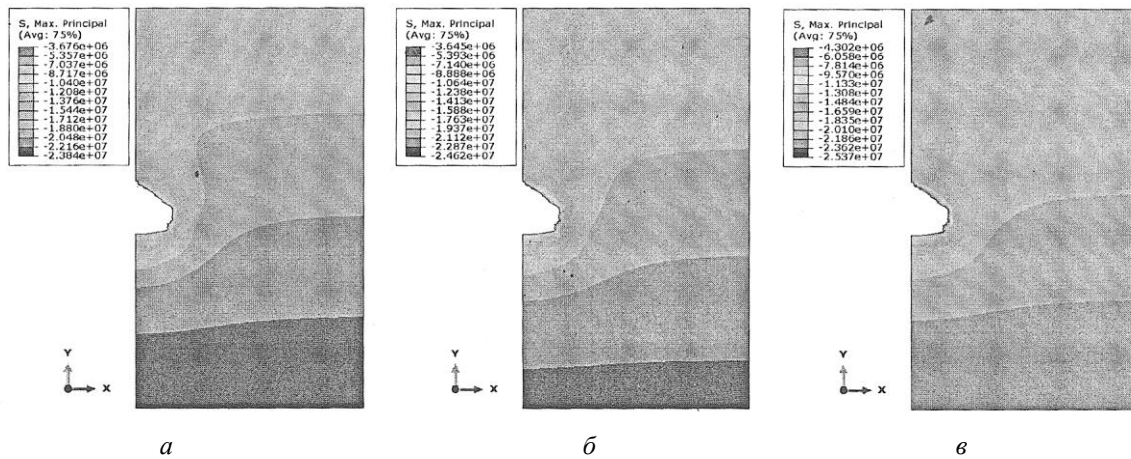


Рис. 7. Распределение максимальных главных напряжений (в Па) в окрестности проектной выработки-емкости на скважине при циклическом режиме эксплуатации:

а)  $p_{min}=3 \text{ МПа}$ ,  $p_{max}=13,3 \text{ МПа}$ ; б)  $p_{min}=2,5 \text{ МПа}$ ,  $p_{max}=13,3 \text{ МПа}$ ; в)  $p_{min}=2,5 \text{ МПа}$ ,  $p_{max}=15,2 \text{ МПа}$

Анализ полученных результатов расчетов показывает, что растягивающие напряжения в кровле и окрестности выработки-емкости при выбранных режимах ее эксплуатации не возникают.

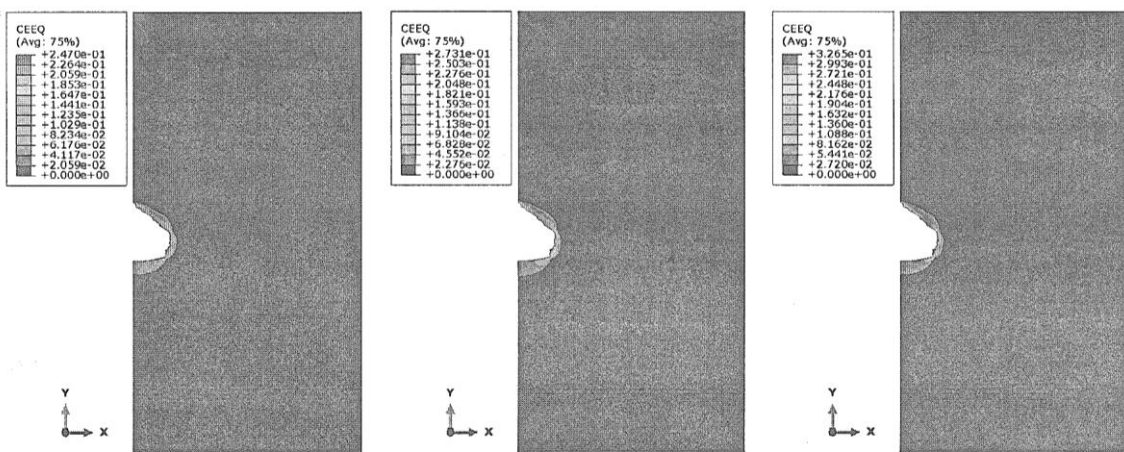


Рис. 8. Распределение деформаций ползучести (в д.е.) в окрестности проектной выработки-ёмкости при аналогичных режимах эксплуатации (см. рис. 7)

Конвергенция проектной выработки-емкости с начальным геометрическим объемом 50,5 тыс. м<sup>3</sup> за 50 лет при заданном циклическом режиме эксплуатации и диапазоне эксплуатационных давлений  $p_{min}=3$  МПа,  $p_{max}=13,3$  МПа может составить 4,5%, а при  $p_{min}=2,5$  МПа,  $p_{max}=13,3$  МПа и  $p_{min}=2,5$  МПа,  $p_{max}=15,2$  МПа - 5,5%.

### Заключение

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о длительной устойчивости подземного резервуара на основе критериев, приведенных в [4]:

- 1) вся поверхность выработки не принадлежит ОЗД;
- 2) объем ОЗД в кровле составляет 85 м<sup>3</sup>, что не превышает 700 м<sup>3</sup>;
- 3) максимальный размер ОЗД в кровле в направлении, нормальном поверхности выработки-емкости, составляет 1,13 м, что не превышает  $0,04L_{max}=2,16$  м;
- 4) растягивающие напряжения в породном массиве не возникают.

Ввиду отсутствия достоверных и полных данных по механическим свойствам вышележащих горных пород и горных пород, вмещающих подземный резервуар, рекомендуется принять для эксплуатации, соответственно, минимальное и максимальное давления  $p_{min}=3$  МПа и  $p_{max}=13,3$  МПа на башмаке составной основной обсадной колонны, а на устье скважины - 2,85 МПа и 12,5 МПа.

Для выполнения дальнейших прочностных расчетов, связанных с эксплуатацией подземного резервуара, и на других скважинах рекомендуется выполнять отбор и комплексное исследование kernового материала на новых скважинах. Принимая во внимание значительное уменьшение вместимости подземного резервуара за длительный период эксплуатации, рекомендуется рассмотреть вопрос об увеличении геометрического объема подземного резервуара путем его доразмыва.

Ն.Վ. Փիրումյան,  
Հ.Ա. Ղազարյան,  
Մ.Գ. Ստակյան

### ԱՊԱՐԱՅԻՆ ԶԱՆԳՎԱԾԻ ԼԱՐՎԱԾՍԴԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ՎԻՃԱԿԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆԸ ԳԱԶԻ ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ ՊԱՀԵՍՏԱՐԱՆԻ ԳՈՏՈՒՄ

*Դիտարկված է քարաղի ստորգետնյա շերտերի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը, որոնցում տեղաբաշխված են գազի ստորգետնյա պահեստարանները (ԳՄՊ)՝ դրանց շահագործական հուսալիության գնահատման նպատակով: Ապարների ամրության հաշվարկների համար ընդունված են Դրուկեր-Պրագերի ռեոլոգիական մոդելը և քարաղի շերտերի անշարժության պայմանը: Ապարների ամրության և դեֆորմացիաների որոշման համար կիրառվել է վերջնային տարրերի մեթոդը (ՎՏՄ) և ստացվել են նշված պարամետրերի մեծությունները, որոնք թույլ են տալիս ճնշումների  $p=2,5...15,2$  ՄՊա միջակայքում ԳՄՊ-ի տրված ծառայության ժամկետում ապահովել դրա անվտանգ շահագործումը:*

**Առանցքային բառեր.** գազի ստորգետնյա պահեստարան (ԳՄՊ), քարաղի ստորգետնյա շերտեր, շերտերի լարումներ և դեֆորմացիաներ, ապարների ամրություն, ԳՄՊ-ի շահագործում

## CHANGING THE STRESSED-DEFORMED CONDITION OF THE ROCK MASSIVE IN UNDERGROUND GAS STORAGE ZONE

*The stressed-deformed state of underground rock salt beds is considered, where underground gas storage tanks (UGSs) are located, in order to assess the reliability of UGS operation. The rheological model of the Drucker-Prager and the condition of the immobility of the salt layers in the reservoir zone have been adopted for strength calculations of rocks. To determine the stresses and deformations of rocks, the finite element method (FEM) was applied and their values were obtained, allowing for a safety interval of  $p = 2.5 \dots 15.2$  MPa for a given UGS life cycle to ensure service security.*

**Keywords:** *underground gas storage (UGS), underground rock salt beds, stress and strain of layers, rock strength, UGS service*

### Литература

1. **Пирумян Н.В, Казарян Ю.А., Стакян М.Г.** Оценка прочности и долговечности эксплуатационной колонны подземного хранилища газа //Научн. тр. НУАСА. – 2016. – Т.IV(63). - С.129-136.
2. **Казарян А.А.** Анализ результатов испытаний резервуара станции подземного хранилища газа // Вест. Инж. акад. Армении. – 2016. - Т.13, № 4. – С.56-62.
3. **СТО Газпром 2-2.3-056-2006.** Регламент по проведению экспертизы промышленной безопасности скважин подземных хранилищ газа и назначению (продлению) срока их безопасной эксплуатации. – М.: Газпром экспо, 2006. – 56 с.
4. **СТО Газпром 2-2.3-145-2007.** Инструкция по техническому диагностированию скважин и ПХГ. – М.: Газпром экспо, 2007. – 64 с.

**Աշխատանքն իրականացված է ՀՀ պետական բյուջեից գիտական և գիտատեխնիկական գործունեության բազային ֆինանսավորմամբ «Գիտահետազոտական սեկտորի պահպանում և զարգացում» և «ՀՀ ճարտարապետական և շինարարական համալիրների կայուն զարգացման ուղիների բացահայտում, ճշգրտում, ներդրման առաջարկությունների և հանձնարարականների մշակում՝ մշտական մոնիտորինգի կիրառմամբ» ծրագրերի շրջանակներում:**

**Փիրումյան Նարինե Վիլիկի, տ.գ.թ.** (ՀՀ, ք.Երևան) - ՃՀՀԱՀ, Գիտահետազոտական սեկտորի պահպանում և զարգացում ծրագրի ղեկավար, տ.գ.ա., (+374)10580541, science@nuaca.am, **Ղազարյան Հմայակ Աշոտի** (ՀՀ, ք.Երևան) – ՃՀՀԱՀ, հայցորդ, (+374) 98777107, hmayak.khazaryan@yandex.com, **Ստակյան Միհրան Գրիգորի, տ.գ.դ., պրոֆ.** (ՀՀ, ք.Երևան) - ՃՀՀԱՀ, ակ. Ալ. Թամանյանի անվ. ճարտարապետության և շինարարության պրոբլեմային լաբորատորիա, տ.գ.ա., ՀԱՊՀ, Մեքենագիտության ամբիոն, (+374) 10554362, stakyan.mihran@yandex.ru  
**Пирумян Нарине Виликовна, к.т.н.** (РА, г.Ереван) - НУАСА, Проблемная лаборатория Сохранения и развития научно-исследовательского сектора, рук. программы, с.н.с., (+374)10580541, science@nuaca.am, **Казарян Амаяк Ашотович** (РА, г.Ереван) – НУАСА, соискатель (+374) 98777107, hmayak.khazaryan@yandex.com, **Стакян Мигран Григорьевич, д.т.н., проф.** (РА, г.Ереван) – НУАСА, Проблемная лаборатория Архитектуры и строительства им. академика Ал. Таманяна, с.н.с, ИПУА, кафедра Машиноведения, (+374) 10554362, stakyan.mihran@yandex.ru  
**Pirumyan Narine Vilik, doctor of philosophy (Ph.D) in engineering** (RA, Yerevan) - NUACA, Problem laboratory of preservation and development of scientific research sector, programme supervisor, senior scientific researcher, (+374) 10580541, science@nuaca.am, **Ghazaryan Hmayak Ashot** (Yerevan, RA) – NUACA, applicant, (+374) 98777107, hmayak.khazaryan@yandex.com, **Stakyan Mihran Grigor, doctor of science (engineering), prof.** (Yerevan, RA) – NUACA, Research Laboratory of Architecture and Construction by Academician Al. Tamanyan, senior scientific researcher, NPUA, (+374) 10554362, stakyan.mihran@yandex.ru

Ներկայացվել է՝ 16.01.2017թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 01.02.2017թ.