

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА

Рассматриваются вопросы обеспечения несущей способности наиболее нагруженных элементов конструкции подземных хранилищ газа (ПХГ) – эксплуатационных колонн, установленных в соляных пластах Абовянской станции ПХГ. Оценка эксплуатационной надежности колонны производится исследованием напряженно-деформированного состояния породного массива методом МКЭ с применением положений теории упругости.

Ключевые слова: подземное хранилище газа, соляная порода, геофизическое исследование, прочность эксплуатационной колонны, остаточный срок службы

Введение

Рабочая толща, в которой размещаются подземные резервуары Абовянской СПХГ, представлена соленосными отложениями среднего миоцена [1]. Глубина залегания их кровли меняется в пределах 288.0...707,5 м, подошвы – 880...1193 м, максимально вскрытая мощность – 784 м. Глубина технологических скважин ПХГ ограничена глубиной залегания подошвы соляной залежи и составляет 1050 м, ниже по разрезу залегает песчано-глинистая толща пород нижнего миоцена. Интервалы заложения подземных резервуаров выбраны в пределах глубин 790...1015 м для каждой скважины индивидуально в связи с очень сложным строением разреза соляной залежи. Разрез рабочего горизонта сложен пластами каменной соли с прослоями и пропластками несоляных пород, представленных, как правило, серо-цветными глинами с зеленоватым оттенком.

Участок территории на левом берегу р.Раздан, где расположена эксплуатационная скважина, представляет собой древнюю террасу реки. На восточной границе этой террасы из-под столбчатых базальтов Птгнинского потока обнажаются постплиоценовые диатомитовые глины субвертикального залегания. Высокий бор этой террасы сверху сложен высокопрочными столбчатыми базальтами, имеет достаточно прочное основание за счёт большого процента включений щебёнки и обломков базальта. Суглинистые фракции грунтов основания легковымываемые и при увлажнении теряют свою прочность. Эрозионные процессы происходят активно.

Геофизическое исследование разреза ПХГ

В геологическом строении разреза, вскрытого скважиной, принимают участие нижние неогеновые (средний и верхний миоцен) отложения (0...1000 м). Отложения нижнего неогена в верхней части представлены серыми, красноцветными, отшлакованными андезито-базальтами (0...80 м), а ниже – серыми и зеленоватыми плотными аргиллитоподобными глинами (80...480 м). Под глинами вскрыты отложения соленосной толщи нижнего и среднего миоцена, слагаемой чередующимися пластами и пачками каменной соли и соленых глин различной мощности. До глубины 700 м вскрыта толща сильно загрязнённых и часто перемежающихся между собой пластов каменных солей и глин.

В интервале 700...1000 м разрез соленосной толщи представлен относительно редким чередованием пластов более чистой каменной соли (белой, серовато-белой и серой), в составе которых наблюдаются включения и прослои глин серого и зелёного цветов. Вскрытая мощность пластов соли с прослоями глин меняется от 5 до 76 м, вскрытая мощность прослоев глин в пластах соли составляет 5...10 см, редко достигает 0,7...0,8 м (интервалы 746...823 м и 832...874 м). Вскрытая мощность пластов глин в этом интервале разреза толщи составляет 1,0...2,5 м.

Учитывая сложное строение геологического разреза площадки СПХГ и содержание в верхней части соленосной толщи, вскрытой скважиной с большим количеством прослоев глин, для строительства был рекомендован интервал заложения подземного резервуара 790...1000 м.

Согласно существующему отраслевому нормативному документу [2] для определения фактического состояния эксплуатационной скважины в интервале глубине 0...808,5 м был выполнен стандартный набор геофизических исследований, результаты которых показали:

- шаблонирование ствола эксплуатационной скважины установило достаточную проходимость для геофизического оборудования;
- измерения температуры по эксплуатационной скважине (прибор ТЛМ-36) не показали наличия серьезных температурных аномалий, что косвенно указывает на отсутствие оттоков и притоков жидкости (рассола);
- инклинометрия ствола эксплуатационной скважины (прибор ИН-М2) показала, что на глубине 786 м происходит резкое увеличение угла наклона до 4,5° с последующим снижением до 0,7°, что обусловлено, скорее всего, столкновением инклинометра с оставшейся подвесной колонной диаметром 127 мм. Максимальное отклонение обсадной колонны достигает 6,0° в интервале 582...607 м. На глубине 808 м отмечена посадка инклинометра под углом 11,8°;
- акустическая цементметрия основной обсадной колонны Ø299 мм (прибор АК2-М) показала, что в интервале 540,5...792,0 м имеется хорошее сцепление цементного камня с последней зацементированной колонной и породой;
- магнитно-импульсная дефектоскопия основной обсадной колонны Ø299 мм (прибор МИД-К) показала, что вся колонна подвержена значительной коррозии, особенно на участке 383,6...394,2 м. Участок с минимальной интегральной толщиной трубы, равной 6,6 мм, наблюдается в интервале 427,5...437,9 м, что в два раза меньше, чем первоначальная толщина стенки трубы на момент сдачи в эксплуатацию.

На основании результатов геофизического исследования было принято решение не проводить комплексные испытания подземного резервуара на герметичность, а выполнить ремонтные работы на скважине и спуск новой основной обсадной колонны труб Ø 219 мм.

Результаты прочностных расчетов и определение остаточного срока службы эксплуатационной колонны

Наиболее уязвимым и в то же время доступным для контроля и ремонта элементом подземного резервуара в каменной соли является эксплуатационная колонна. К числу важных факторов, оказывающих существенное влияние на техническое состояние эксплуатационной колонны и возникновение возможных повреждений, относятся: внутреннее избыточное давление продукта хранения; внешнее давление горных пород (в том числе - неравномерное давление при их смещении вследствие пластичности); переменные температурные нагрузки при закачке и отборе продукта

хранения; коррозионное воздействие рабочих сред изнутри и снаружи эксплуатационной колонны. Кроме того, в процессе строительства и эксплуатации колонна обсадных труб подвергается различным механическим повреждениям [3,4].

Анализ возможных дефектов эксплуатационных колонн показывает, что некоторые из них являются критическими и недопустимыми, поскольку они препятствуют дальнейшей эксплуатации подземных резервуаров и создают опасность возникновения различного рода аварийных ситуаций. Такие дефекты должны быть немедленно устранены, а при невозможности их устранения эксплуатационная колонна, а в некоторых случаях и подземный резервуар подлежат ликвидации. Оценка степени опасности дефекта, а также определение срока и параметров режима безопасной эксплуатации колонны с таким дефектом должны проводиться на основе расчета ее остаточной прочности.

Основанием для проведения расчётов на остаточную прочность труб эксплуатационной колонны является обнаружение в ходе проведённого диагностического обследования отклонений от нормативных значений параметров нагрузок, условий окружающей среды, а также изменение формы и размеров сечений колонны (коррозионные и механические повреждения, нарушения целостности заколонного цементного камня).

Согласно существующим нормативным документам [5] следует проводить периодическое техническое диагностирование скважин ПХГ через каждые пять лет эксплуатации, но в обязательном порядке в течение последнего года, предшествующего достижению назначенного срока безопасной эксплуатации объекта ПХГ.

Оценка эксплуатационной надежности породного массива, вмещающего подземные выработки, производится методом конечных элементов (МКЭ) с применением программного пакета “ABAQUS UNIFIED FEA”, v.6, который имеет сертификат соответствия требованиям нормативных документов в области строительства и эксплуатации подземных хранилищ газа и других подземных сооружений.

В случае осесимметричной задачи в результате приложения нагрузки у геометрии сооружения, свойств нагружаемой области и граничных условий будут меняться только координаты r и z точек среды, а узловая цилиндрическая координата θ останется неизменной (рис.). Вследствие этого анализ ведется в координатной плоскости r – z , рассматриваемый при этом конечный элемент принимает форму кольца треугольного или прямоугольного поперечного сечения. Производится аппроксимация функции перемещений в пределах элемента линейными полиномами

$$\begin{cases} u = a_1 + a_2 r + a_3 z, \\ v = a_4 + a_5 r + a_6 z. \end{cases} \quad (1)$$

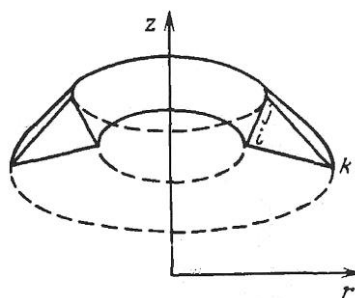


Рис. Осесимметричный элемент в цилиндрической системе координат

В матричной форме данное уравнение имеет вид

$$\{u\} = [A]\{\alpha\}, \quad (2)$$

где $\{u\} = \{u_i u_j u_k v_i v_j v_k\}$ – вектор узловых перемещений;

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & r_i & z_i & 0 & 0 & 0 \\ 1 & r_j & z_i & 0 & 0 & 0 \\ 1 & r_k & z_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & r_i & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & r_j & z_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 & r_k & z_k \end{bmatrix} \quad \{\alpha\} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix}$$

– координатная матрица; – вектор параметров;

u, v – перемещения в направлениях r, z ; r_i, z_i – координаты узлов.

Неизвестные параметры $\{\alpha\}$ определяются по формуле

$$\{\alpha\} = [A]^{-1}\{u\}. \quad (3)$$

Подставляя в уравнение деформационного состояния функции перемещения и дифференцируя, получаем выражение для шести узловых перемещений

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\alpha\} = [B][A]^{-1}\{u\}, \quad (4)$$

где

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{r} & 1 & \frac{z}{r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

В осесимметричной задаче деформации и напряжения в узлах непостоянны и зависят от координаты.

Уравнение закона Гука имеет вид

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\}, \quad [E] = \frac{E}{(1+\nu)(\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Совместно решив (4) и (5), получим уравнение связи между напряжениями и перемещениями

$$\{\sigma\} = [E][B][A]^{-1}\{u\}. \quad (6)$$

Потенциальная энергия упругого деформирования элемента определяется по формуле

$$U = \iiint_g (\bar{\varepsilon}_r \sigma_r + \bar{\varepsilon}_\theta \sigma_\theta + \bar{\varepsilon}_z \sigma_z + \bar{\gamma}_{rz} \tau_{rz}) dr dz d\theta, \quad (7)$$

которую можно привести к виду

$$U = \nu \{\bar{\varepsilon}\}^T \{\sigma\}, \quad (8)$$

где $\nu = 2\pi r_{cp} \Delta$ – объем элемента; Δ – площадь сечения элемента;

$$\{\bar{\varepsilon}\} = [B][A]^{-1}\{u\}; \quad \{u\} = \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}.$$

Используя принцип возможных перемещений $\{\bar{\varepsilon}\}^T = \{\bar{u}\}^T [A]^{-1T} [B]^T$, $\{\sigma\} = [E][B][A]^{-1}\{u\}$, получим выражение для узловой силы X_i

$$X_i = v\{\bar{\varepsilon}\}^T \{\sigma\} = \{\bar{u}\}^T [A]^{-1T} [B]^T [E][B][A]^{-1} \{u\}. \quad (9)$$

Заменяя в уравнении (9) вектор $\{u\}$ на единичную матрицу шестого порядка, получим матричную формулу, связывающую составляющие узловых сил с узловыми перемещениями

$$\{X\} = [k]\{u\}. \quad (10)$$

Введем обозначение для матриц: $[E^*] = [B]^T [E][B]$, тогда матрица жесткости осесимметричного элемента, имеющего в сечении треугольник, примет вид

$$[k] = 2\pi r_{cp} [A]^{-1T} [E^*][A]^{-1}. \quad (11)$$

Для определения напряженно-деформированного состояния рассматриваемой области необходимо задать условия на ее границах. В соответствии с классификацией задач теории упругости граничные условия могут быть заданы напряжениями, смещениями, а также совместно. При наличии на границах области распределения нормальных и касательных нагрузок они сводятся к узловым силам в проекциях на оси oz и or цилиндрической системы координат. В качестве узловой принимается нагрузка, действующая по всему периметру окружности

$$\begin{cases} X_j = -2\pi r_j \frac{l_{ij} + l_{jk}}{2} (p_j \sin \alpha_j + q_j \cos \alpha_j), \\ Y_j = -2\pi r_j \frac{l_{ij} + l_{jk}}{2} (p_j \cos \alpha_j + q_j \sin \alpha_j), \end{cases} \quad (12)$$

где X_j, Y_j – составляющие узловой нагрузки вдоль радиального направления и оси oz ; r_j – расстояние от узла j до оси oz ; p_j, q_j – соответственно, нормальная и касательная нагрузки на единицу длины кольцевого периметра.

При учете сил тяжести определяется вес осесимметричного элемента, имеющего в сечении треугольник, который распределяется поровну между узлами, окружающими элемент. Узловые нагрузки определяются по формуле

$$Y_j = \frac{2}{3} \pi \sum_{m=1}^t \Delta_m \gamma_m r_m, \quad (13)$$

где r_m – расстояние от оси oz до центра тяжести треугольника.

В качестве начальных условий обычно задаются начальными напряжениями или деформациями. Напряжения в элементе при наличии начальных деформаций $\{\varepsilon_0\}$ определяются по формуле

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon - \varepsilon_0\}. \quad (14)$$

Тогда формула для узловых сил принимает вид

$$\{X\} = [k]\{u\} - \{X_0\}, \quad (15)$$

где $\{X_0\}$ – вектор обобщенных сил в узлах элемента, эквивалентных заданию начальных деформаций.

При начальных напряжениях $\{\sigma_0\}$ задача решается аналогично. Деформации с учетом начальных напряжений определяются по формуле

$$\{\varepsilon\} = [E]^{-1} \{\sigma - \sigma_0\}. \quad (16)$$

Таким образом, представлена полная совокупность систем уравнений для решения линейной задачи теории упругости. В результате расчетов определяются все компоненты тензоров напряжений и

деформаций во всех конечных элементах. На основании этих данных в окрестности контура находится некоторая область, где $\varepsilon_i > \varepsilon_i^{\infty}$, т.е. где деформации превышают предельные значения ползучести каменной соли. Такая область называется областью запредельного деформирования (ОЗД). Затем полученные значения сопоставляются с предельно допустимыми величинами, задаваемыми принятыми критериями устойчивости.

Согласно нормативным документам выработка является устойчивой, если:

- не вся поверхность выработки принадлежит ОЗД;
- объем ОЗД в кровле не превышает величины $V_{adm} = 700 \text{ м}^3$;
- максимальный размер ОЗД в кровле в направлении, нормальном поверхности выработки-емкости, не превышает $0,04l$ (l - пролет кровли выработки-емкости);
- растягивающие напряжения в породном массиве не превышают прочность пород при растяжении.

Долговечность скважин ПХГ

Срок службы подземных резервуаров в каменной соли в действующих и рекомендуемых нормативах строго не определен и зависит от срока службы его компонентов, установленных заводом-изготовителем, либо же по результатам экспертизы промышленной безопасности при продлении срока. Стандартом [6] устанавливается срок безопасной эксплуатации скважин ПХГ, завершаемых строительством. К группе I (продукция скважин не содержит коррозионно-активных и абразивных компонентов, и не имеется неустойчивого пласта-коллектора) относятся ПХГ в каменной соли. Для I группы срок безопасной эксплуатации скважин составляет 42 года, у остальных компонентов скважинного и устьевого образования – ниже. Таким образом, срок службы выработки-емкости не должен быть ниже 42 лет. В связи с установившейся практикой и ввиду описанных выше факторов для обеспечения эксплуатационной надежности выработки-емкости производится оценка ее устойчивости на срок до 50 лет [7, 8]. При отсутствии возможности заранее определить весь режим эксплуатации подземных резервуаров на весь срок их работы, в расчетах принимается гипотетический режим работы подземных резервуаров. Такое допущение соответствует нормативному документу [9], т.к. принятый для расчетов режим обеспечивает наименее благоприятное сочетание нагрузок.

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

ԳԱԶԻ ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ ՊԱՀԵՍԱՐԱՆԻ ՇԱՀԱԳՈՐԾԱԿԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՍՅԱՆ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԵՐԿԱՐԱԿԵՅՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ

Դիտարկվում են գազի ստորգետնյա պահեստարանների (ԳՄՊ) առավել բեռնավորված կոնստրուկցիոն տարրի՝ շահագործական խողովակայունների կրողունակության ապահովման հարցերը, որոնք տեղակայված են Արմյանի ԳՄՊ կայանի ստորգետնյա աղային շերտերում: Խողովակայան շահագործական հոսալիության գնահատումը կատարվում է ապարային զանգվածի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի հետազոտմամբ՝ փոքրագույն տարրերի մեթոդով

(ΦSU), կիրառելով առաձգականության տեսության դրույթները:

Առանցքային բառեր. գազի ստորգետնյա պահեստարան, աղային ապար, երկրաֆիզիկական հետազոտություն, շահագործական խողովակապան ամրություն, ծառայության մնացորդային ժամկետ

N.V.Pirumyan
H.A.Ghazaryan,
M.G.Stakyan

ASSESSMENT OF STRENGTH AND DURABILITY OF PRODUCTION CASING OF UNDERGROUND GAS STORAGE

The paper discusses the issues of provision of bearing capacity of the most loaded elements of underground gas storage (UGS) structures - production casings installed in the salt strata of Abovyan UGS station. Assessment of operational reliability of the production casing is carried out by a study of stress-strain state of rock mass by the FEM method using the statements of the elasticity theory.

Keywords: *underground gas storage, salt rock, geophysical study, production casing strength, remaining service life*

Литература

1. **Казарян А.А.** Анализ результатов испытаний резервуара станции подземного хранилища газа // Вест. Инж. Акад. Армении. – 2016. - Т.13, № 4. – С.
2. **Р Газпром 2-3.5-368-2009.** Рекомендации по проведению диагностического обследования подземных резервуаров в каменной соли. – М.: Газпром экспо, 2010. – 80 с.
3. **Винокурцев А.Г.** и др. Совершенствование технических средств для коррозионного мониторинга газопроводных систем // Теоретические основы тепло-газоснабжения и вентиляции: Мат. 3-й междунар. н.-т. конф. – М.: МГСУ, 2009. – С. 81-84.
4. **Гумеров А.Г., Гаспарян Р.С.** Расчет на прочность и выбор рациональных конструктивных решений прокладки подземных газопроводов на пересеченном рельефе местности // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2007. – № 4. – С.26-27.
5. **СТО Газпром 2-2.3-145-2007.** Инструкция по техническому диагностированию скважин и ПХГ. – М.: Газпром экспо, 2007. – 64 с.
6. **СТО Газпром 2-3.5-770-2013.** Методика расчетов сроков безопасной эксплуатации скважин ПХГ. – М.: Газпром экспо, 2013. – 53 с.
7. **Харионовский В.В.** Экспресс-метод прогнозирования ресурса магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2005. – № 6. – С. 88-90.
8. Надежность и ресурс газопроводных конструкций: Сб. науч. тр. – М.: ООО “ВНИИГАЗ”, 2003. – 216 с.
9. **СП 20.13330.2011.** Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. – М., 2011. – 42 с.

Աշխատանքն իրականացված է ՀՀ պետական բյուջեից գիտական և գիտատեխնիկական գործունեության բազային ֆինանսավորմամբ «ՀՀ ճարտարապետական և շինարարական համալիրների կայուն զարգացման ուղիների բացահայտում, ճշգրտում, ներդրման առաջարկությունների և հանձնարարականների մշակում մշտական մոնիտորինգի կիրառմամբ» ծրագրի շրջանակում:

Փիրումյան Նարինե Վիլիկի, տ.գ.թ. (ՀՀ, ք.Երևան) - ՃՀՀԱՀ, Գիտահետազոտական սեկտորի պահպանում և զարգացում ծրագրի ղեկավար, թ.գ.ա., (+374) 10580541, science@nuaca.am, **Ղազարյան Հմայակ Աշոտի** (ՀՀ, ք.Երևան) – ՃՀՀԱՀ, հայցորդ, (+374) 98777107, հmayak khazaryan@yandex.com, **Ստակյան Միհրան Գրիգորի, տ.գ.թ., պրոֆ.** (ՀՀ, ք.Երևան)- ՃՀՀԱՀ, ակ. Ալ. Թամանյանի անվ. ճարտարապետության և շինարարության պրոբլեմային լաբորատորիա, թ.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, НПУА, кафедра Машиноведения, (+374) 10554362, stakyan.mihran@yandex.ru.

Pirumyan Narine Vilik, doctor of philosophy (PhD) 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 technical sciences, 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՝ 05.12.2016թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 09.12.2016թ.