

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

А.В. Воронова, А.А. Скворцов, Т.Ю. Журавлева

ООО «Газпром геотехнологии», 123290, г. Москва, ул. 1-я Магистральная, д. 11/2,
a.voronova@gazpromgeotech.ru

При бурении газодобывающих скважин на Бованенковском газоконденсатном месторождении образуется большой объем буровых отходов. Традиционные методы утилизации буровых отходов не применимы для территории Бованенковского НГКМ по экологическим и экономическим причинам. ООО «Газпром геотехнологии» было предложено использовать скважинные подземные резервуары, сооруженные в массиве многолетнемерзлых пород (ММП) для захоронения буровых отходов [1]. Подземный резервуар (ПР) строится методом водно-теплового оттаивания многолетнемерзлых пород с последующей откачкой получившейся водно-песчаной смеси. В построенный резервуар закачиваются отходы бурения и резервуар консервируется.

Учитывая неоднородность массивов многолетнемерзлых горных пород и разнообразие горно-геологических условий, которые достаточно сложно описать строгими математическими закономерностями, для геомеханики характерно широкое использование методов моделирования, позволяющих выявить и оценить в исследуемых процессах роль различных действующих факторов и получить значения необходимых параметров даже при невозможности строгого решения задач аналитическими методами.

Для численного решения задачи по оценке устойчивости рассматривается породный массив, в котором имеются выработки, расположенные на некотором расстоянии от поверхности земли. Задача решается методом конечных элементов (МКЭ) с применением программного комплекса ABAQUS. Полученные значения сопоставляются с предельно допустимыми величинами, задаваемыми разработанными критериями устойчивости.

Используемая методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах подробно показана на примере одной из кустовых площадок резервуаров Бованенковского НГКМ. На кустовой площадке было построено 4 подземных резервуара.

После окончания строительства была проведена звуколокационная съемка резервуаров, на основе которой были построены осесимметричные формы резервуаров для численного моделирования (рисунок 1).

Ввиду технологических сложностей по осуществлению контроля процесса строительства ПР, построенные формы могут существенно отличаться от проектных, что несомненно скажется на устойчивости резервуаров.

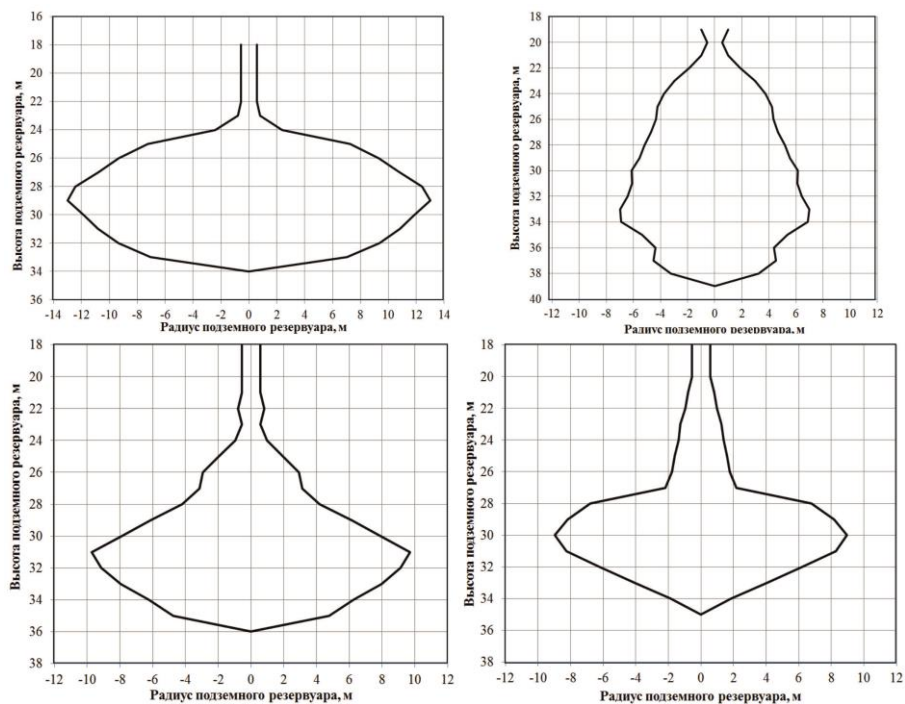


Рис. 1. Формы подземных резервуаров 54-ПР-1, 54-ПР-2, 54-ПР-3, 54-ПР-4 по результатам звуколокации

Авторами была разработана методика оценки длительной устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах. Результатом данной оценки является категория устойчивости подземного резервуара, исходя из которой определяются технологические параметры дальнейшей эксплуатации. Для определения категории устойчивости ПР используются следующие расчетные схемы:

- первая категория устойчивости – ПР является устойчивым, если по результатам расчета допускается его консервация сроком на три года без заполнения;
- вторая категория устойчивости – ПР является условно устойчивым, если по результатам расчета допускается его консервация сроком на три года с заполнением ПР водой до устья скважины или газом под избыточным давлением, определяемым по результатам дополнительных расчетов или равным давлению столба воды от устья;
- третья категория устойчивости – ПР является неустойчивым, если по результатам расчета он является неустойчивым при его консервации сроком на три года по любой из выше предложенных технологий консервации.

Для упрощения задачи в расчете использовались осесимметричные модели, построенные по результатам усреднения радиусов выработки на каждой глубинной отметке. Принятое допущение позволяет существенно сократить расчетное время без ущерба точности расчетов.

Физико-механические свойства многолетнемерзлых пород и параметры упруго-вязко-пластичной модели Друккера-Прагера, используемые при расчетах, определялись по результатам лабораторных испытаний. Пример реологических испытаний многолетнемерзлого суглинка при ступенчатом нагружении приведен на рисунке 2. При испытании боковая нагрузка составляла 200 кПа, а осевая нарастала с шагом 150 кПа и действовала до достижения критерия стабилизации деформаций.

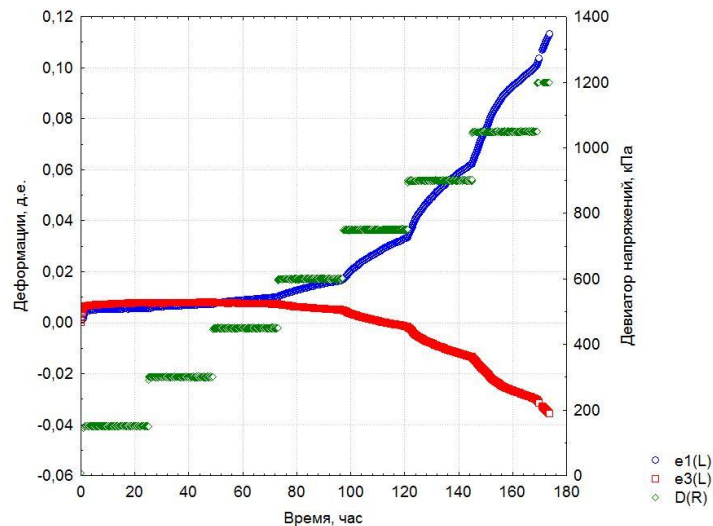


Рис. 2. Изменение осевой и поперечной деформаций во времени при проведении трехосных ступенчатых испытаний многолетнемерзлого суглинка

Пример расчетной схемы представлен на рисунке 3. Верхняя горизонтальная граница расчетной области соответствует дневной поверхности, нижняя горизонтальная граница области располагаются на расстоянии $2,5L$ от поверхности выработки, где L - наибольший её пролет. Вертикальная граница области располагается на расстоянии $3L$ от оси выработки. Вводится система координат X, Y . Ось y направлена перпендикулярно поверхности земли и совпадает с осью скважины ПР.

При численном решении задачи в окрестности полости выделяется некоторая весомая область D , на границах которой задано граничное условие, запрещающее перемещение грани массива параллельной оси Y в направлении X , и граничное условие, запрещающее перемещение нижней границы массива, параллельной оси X - вдоль оси Y .

При расчете заполненного водой в процессе консервации подземного резервуара учитывалось растепление приконтурного массива. На основе звуколокационной съемки производился термодинамический расчет максимального растепления приконтурного массива, которое может возникнуть в процессе эксплуатации подземных резервуаров.

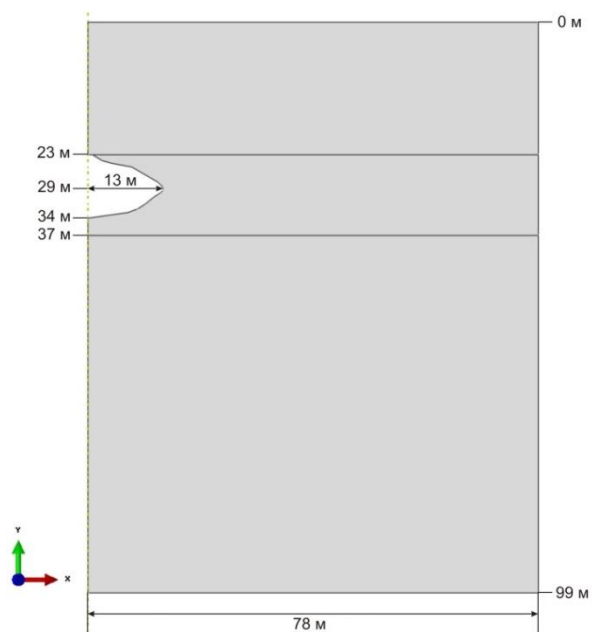


Рис. 3. Расчетная схема для оценки устойчивости подземного резервуара ПР-1

На основании проводимых ранее исследований, литературных данных и с учетом опыта эксплуатации подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах были приняты следующие критерии устойчивости:

- не весь контур выработки находится в области растягивающих напряжений;
- не вся поверхность выработки находится в области чрезмерных деформаций;
- величина оседаний поверхности не превышает $0,025h$ (где h – глубина заложения выработки, т.е. башмака обсадной колонны);
- размер области l по нормали к контуру выработки в окрестности кровли, где величина общей деформации превышает 20 %, не должен превышать n (n – расстояние от кровли подземного резервуара до вышележащих горных пород, т.е. перекрывающих рабочую толщу), в случае, если расстояние до границы рабочей толщи существенно, то l должно быть не более Ω ;
- зона растягивающих напряжений на контуре выработки не должна превышать величин n и Ω .

Под термином чрезмерная деформация подразумевается суммарная составляющая компонентов деформаций по характеру деформирования вмещающих горных пород превышающая 20 %, т.е.

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{plastic} + \varepsilon_{creep} > 20 \%, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{elastic}$ – упругая деформация, д.е.;

$\varepsilon_{plastic}$ –пластическая деформация, д.е.;

ε_{creep} –деформация ползучести, д.е.

Параметр Ω является обобщающим для геометрических размеров подземного резервуара, и был получен на основе анализа опыта

строительства и эксплуатации подземных резервуаров различного назначения в ММП и характеризует устойчивость его формы и степень подработки вышележащего массива.

$$\Omega = 0,04 \cdot \frac{H}{R} \cdot h, \quad (2)$$

где H – высота выработки, м;

R – максимальный полупролет выработки (радиус), м;

h – глубина заложения кровли выработки, т.е. башмака обсадной колонны, м.

В соответствии с предлагаемыми расчетными схемами первоначально проводился расчет длительной устойчивости осесимметричного резервуара в незаполненном состоянии. Временной интервал расчета составляет три года. В случае если результаты расчета удовлетворяют принятым критериям устойчивости, резервуару присваивается первая категория устойчивости.

В случае если результаты расчета не удовлетворяют критериям устойчивости, производится модификация геомеханической модели. В модель вносятся изменения формы резервуара в результате растепляющего воздействия вмещающей жидкости на многолетнемерзлые породы и учитывается технологическое давление внутри резервуара. Результаты данного расчета также сопоставляются с критериями устойчивости. В случае удовлетворения критериям устойчивости, подземному резервуару присваивается вторая категория устойчивости, в противном случае – третья категория.

Подземный резервуар ПР-1 при численном моделировании по данной методике относится к третьей категории устойчивости – он является неустойчивым при его консервации сроком на три года по любой из предложенных технологий консервации.

Подземный резервуар ПР-2 относится к первой категории устойчивости – по результатам расчета допускается его консервация сроком на три года без заполнения, т.е. при атмосферном давлении.

Подземные резервуары ПР-3 и ПР-4 относятся ко второй категории устойчивости – они являются условно устойчивыми, по результатам расчета допускается их консервация сроком на три года с заполнением ПР водой до устья скважины или газом под избыточным давлением.

В случае изменения режима эксплуатации ПР и резкого изменения его состояния требуется выполнять дополнительные расчеты по оценке его устойчивости с учетом появившихся обстоятельств или данных наблюдений. Исходя из оценки устойчивости ПР, формируются рекомендации по эксплуатации, темпам их заполнения, срокам проверки на отклонения от проектных решений и т.п.

Литература

1. Аксютин О.Е., Казарян В.А., Ишков А.Г., Хлопцов В.Г., Теплов М.К., Хрулев А.С., Савич О.И., Сурин С.Д. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. – 432 с.