УДК 622.692.4

А.В. Воронова, А.А. Скворцов

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

Аннотация. В процессе разработки газоконденсатных месторождений на крайнем севере России возникают проблемы захоронения отходов бурения. В качестве хранилища буровых отходов используются подземные резервуары в многолетнемерзлых грунтах, сооружаемые скважинным методом. Главным условием эксплуатации подобных хранилищ является их длительная устойчивость в процессе строительства и эксплуатации. Была проведена оценка устойчивости проектируемых и построенных подземных резервуаров на Харасавейском и Бованенковском месторождениях в соответствии с предлагаемой методикой. Поведение массива многолетнемерзлых пород под нагрузкой описывалось с помощью расширенной упруго-вязко-пластической модели Друкера-Прагера. Требуемые для модели в программном комплексе SimuliaAbaqus параметры, характеризующие физико-механические свойства многолетнемерзлых пород, были получены на основе обработки проведенных лабораторных исследований при температуре естественного залегания. Приведены критерии оценки устойчивости бесшахтных подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах сформулированные на основании проводимых ранее исследований и с учетом опыта эксплуатации. В результате численного моделирования и оценки устойчивости проектируемым и построенным подземным резервуарам были присвоены категории устойчивости в зависимости, от которых выбирается режим эксплуатации подземных резервуаров.

Ключевые слова: оценка устойчивости, подземный резервуар, многолетнемерзлые породы, численное моделирование, геомеханика.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-35-46

Постановка задачи

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 ликвидируется.

Учитывая неоднородность массивов многолетнемерзлых горных пород и разнообразие горно-геологических условий, замкнутых аналитических решений для такого рода геомеханических задач не существует, для этого в настоящее время широко применяется численное моделирование, например, МКЭ, МГЭ, МКР. Такой подход позволяет учитывать самые разнообразные геологические условия, формы подземных резервуаров,

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 9. С. 35–46.
© А.В. Воронова, А.А. Скворцов. 2018.

а также физическую нелинейность поведения горных пород.

Оценка устойчивости бесшахтных подземных резервуаров в каменной соли, а также шахтных резервуаров в многолетнемерзлых породах проводится в соответствии с СП 123.13330.2012 и СТО Газпром 2-3.5-153-2007 [2, 3]. Для подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах для захоронения буровых отходов данная методика не применима в связи с иной схемой и сроками эксплуатации.

Под понятием устойчивости подземного резервуара понимается способность выработки функционировать в требуемых условиях в течение всего периода эксплуатации. 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 Simulia Abaqus. Полученные значения сопоставляются с предельно допустимыми величинами, задаваемыми разработанными критериями устойчивости.

Исходные данные

Используемая методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах подробно показана на примереподземных резервуаров, проектируемых и строящихся на Харасавейском газоконденсатном месторождении, а также построенных на Бованенковском месторождении.Инженерно-геологическая и геомеханическая модели рассматриваемых территорий были созданы на основе данных полевых исследований, проведенных на объектах в течение последних лет, а также на основе монографии «Геокриологические условия Харасавэйского и

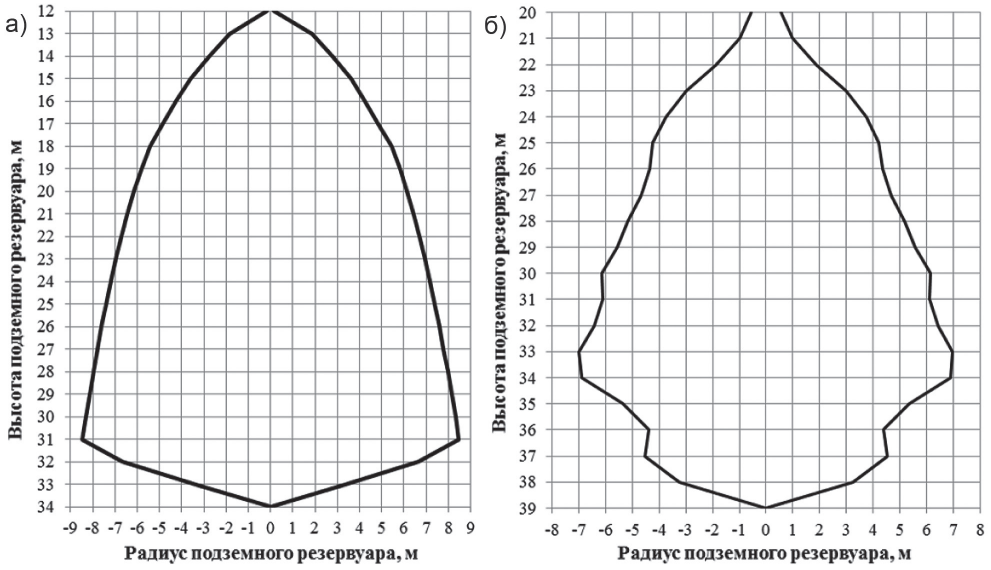

Рис. 1. Проектная форма подземного резервуара объемом 2500 м³ для условий Харасавейского ГКМ (а) и форма построенного подземного резервуара на Бованенковском ГКМ по результатам звуколокации (б)

Fig. 1. Design form of the underground reservoir with a volume of 2500 m³ for Kharasaveiskoyegas condensate field conditions (a) and form of the underground reservoir built at the Bovanenkovskoye gas condensate field on the results of the sonar (b)

Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал)» [4].

Проектные формы подземных резервуаров в условиях Харасавейского ГКМ представляют собой фигуры вращения контура подземной выработки относительно оси скважины, форма которых определяется технологией строительства и инженерно-геологическими условиями территории. В качестве примера проектной формы подземного резервуара представлена форма резервуара объемом 2500 м^3 и высотой 22 м на Харасавейском ГКМ (рис. 1, *а*).

Для условий Бованенковского ГКМ также учитывая геологические, инженерно-геологические и геокриологические условия территории были разработаны проектные формы резервуаров. После окончания строительства была проведена звуколокационная съемка подземных резервуаров, на основе которой были построены осесимметричные формы резервуаров для численного моделирования (рис. 1, *б*). Ввиду технологических сложностей по осуществлению контроля процесса строительства ПР, построенные формы могут существенно отличаться от проектных, что несомненно скажется на устойчивости резервуаров. Для упрощения задачи в расчете использовались осесимметричные модели, построенные по результатам усреднения радиусов выработки на каждой глубинной отметке, что позволяет существенно сократить расчетное время без ущерба точности расчетов.

Расчетные схемы для условий Харасавейского и Бованенковского месторождений составлялись на основе геомеханических моделей территорий. По результатам анализа инженерно-геологических условий и статистической обработки показателей физических и физико-механических свойств многолетнемерзлых пород, залегающих в зоне влияния

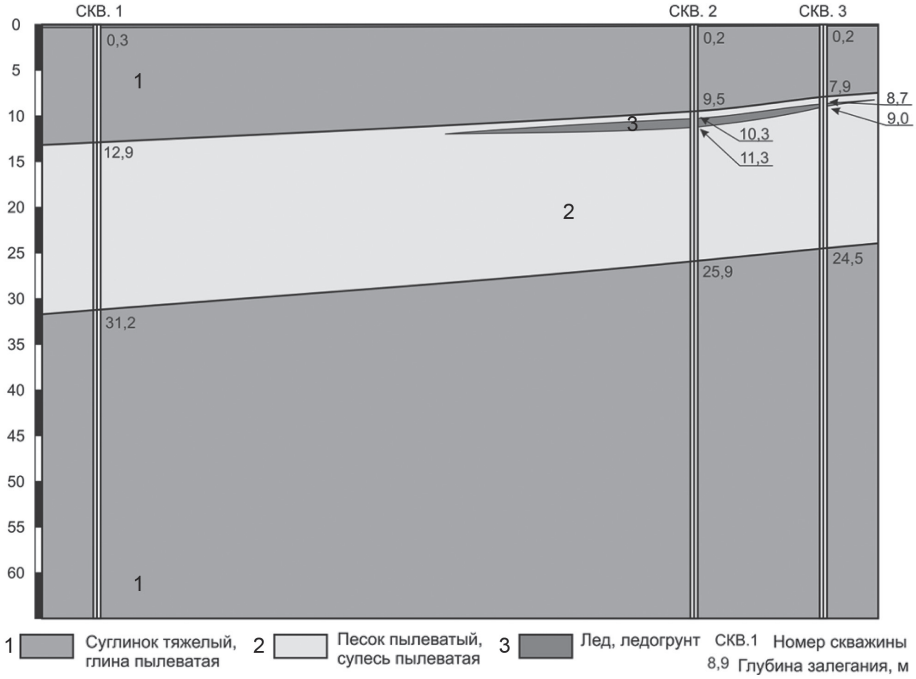

Рис. 2. Геологический разрез кустовой площадки № 13 Харасавейского ГКМ
Fig. 2. Geological section of the bush site No 13, Kharasaveiskoyegas condensate field

подземных резервуаров, представилось возможным выделить три расчетных геологических элемента:

• верхнеплейстоценовые отложения второй-третьей морских террас — многолетнемерзлые суглинки тяжелые, легкие глины, пылеватые, реже песчанистые, твердомерзлые, слабо- и среднезасоленные, льдистые и слабо-льдистые, распространены до глубины 6—17 м на территории Харасавейского месторождения и до глубины 18—22 м на территории Бованенковского месторождения;

• верхнеплейстоценовые морские, прибрежно-морские отложения казанцевской свиты — многолетнемерзлые пески пылеватые, местами с прослоями суглинков и пластовых льдов, твердомерзлые, слабозасоленные, слабольдистые и льдистые, распространены в интервале глубин от 6—17 м до 24—47 м на территории Харасавейского месторождения и в интервале глубин от 18—22 м до 36—42 м на территории Бованенковского месторождения;

• нерасчлененные нижне-среднеплейстоценовые морские отложения ямальской серии — многолетнемерзлые суглинки тяжелые, глины легкие пылеватые, твердомерзлые, слабольдистые, слабо- и незасоленные, на Харасавейском и Бованенковском месторождениях подстилают многолетнемерзлые пески.

В качестве примера на рис. 2 представлен геологический разрез территории одной из кустовых площадок на Харасавейском месторождении.

Подземные резервуары на кустовых площадках рассматриваемых месторождений проектируются и строятся по квадратной сетке с расстоянием между скважинами равным 50 м. Ранее авторами было исследовано взаимовлияние и изменение напряженно-деформированного состояния массива при строительстве и эксплуатации четырех

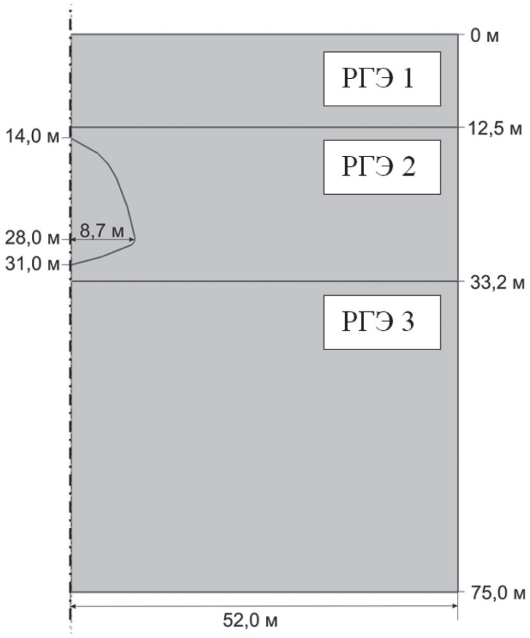

Рис.3. Моделируемый массив многолетнемерзлых пород с выработкой с указанием расчетных геологических элементов (РГЭ)

Fig. 3. The simulated array of permafrost soils with underground reservoir, indicating the estimated geological elements

подземных резервуаров кустовым способом на примере Бованенковского месторождения [5]. Исходя из результатов численного моделирования, был сделан вывод, что взаимовлияние подземных резервуаров с максимальными радиусами до 12 м, при расстоянии между соседними скважинами 50 м, незначительно и им можно пренебречь. Следовательно, допустимо использовать для численного моделирования осесимметричную модель, где ось симметрии совпадает с осью скважины. Пример расчетной схемы представлен на рис. 3.

Верхняя горизонтальная граница расчетной области соответствует дневной поверхности, нижняя горизонтальная граница области располагаются на расстоянии 2,5*L* от поверхности выработки, где *L* — наибольший ее пролет. Вертикальная граница области располагается на расстоянии 3*L* 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*.

Исследование физико-механических свойств многолетнемерзлых пород

В настоящее время проводится некоторое количество зарубежных исследований с целью определения физико-механических свойств многолетнемерзлых пород и корректного моделирования поведения многолетнемерзлых грунтов под нагрузкой с использованием различных упруго-пластичных и упруго-вязко-пластичных моделей [6—10]. Кроме того, при проектировании проводятся исследования свойств многолетнемерзлых пород в соответствии с нормативными документами, в частности в соответствии с ГОСТ 12248-2010 [11], результаты которых только частично могут быть использованы при численном моделировании по выбранной схеме. В данной работе для численного моделирования применялась упруго-вязко-пластическая модель Друкера-Прагера [12, 13].

Физико-механические свойства многолетнемерзлых пород и параметры упруго-вязко-пластичной модели Друккера-Прагера, используемые при расчетах, определялись по результатам лабораторных испытаний. Для выполнения численного моделирования были определены следующие параметры механического поведения вмещающего массива:

- деформационные характеристики горных пород;
- параметры критериальной поверхности для расширенной модели Друкера-Прагера: угол внутреннего трения β и коэффициент сцепления *d* в координатах *p-q*;
- параметры закона пластического течения — напряжения и деформации пластичности, полученные в результате эксперимента;
- константы *A, m, n*, характеризующие ползучесть при различных уровнях напряжений.

Деформационные характеристики многолетнемерзлых пород определяются в соответствии с ГОСТ 12248-2010 в естественном сложении и при температурах, соответствующих глубине залегания образцов. Параметры критериальной поверхности и закона пластического течения для упруго-вязко-пластической расширенной модели Друкера-Прагера определялись по результатам экспериментов по трехосному нагружению многолетнемерзлых глинистых и песчаных

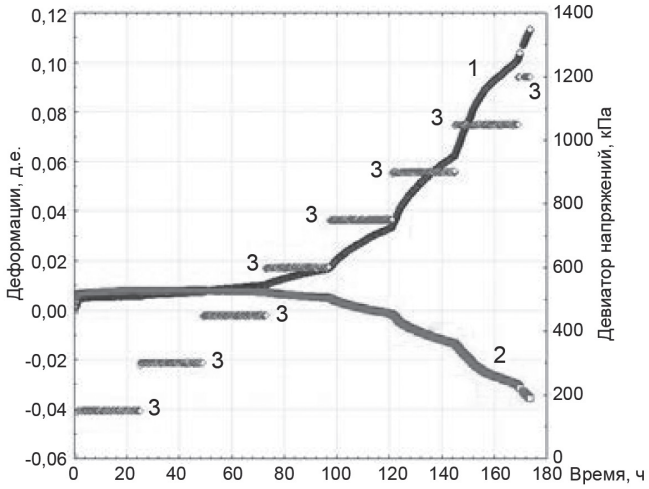

Рис. 4. Изменение осевой (1) и поперечной (2) деформаций во времени при проведении трехосных ступенчатых испытаний многолетнемерзлого суглинка (3 — изменение девиатора напряжений)

Fig. 4. The variation of the axial (1) and transverse (2) deformations with time during the step triaxial tests of permafrostloam (3 — change of the stress deviator)

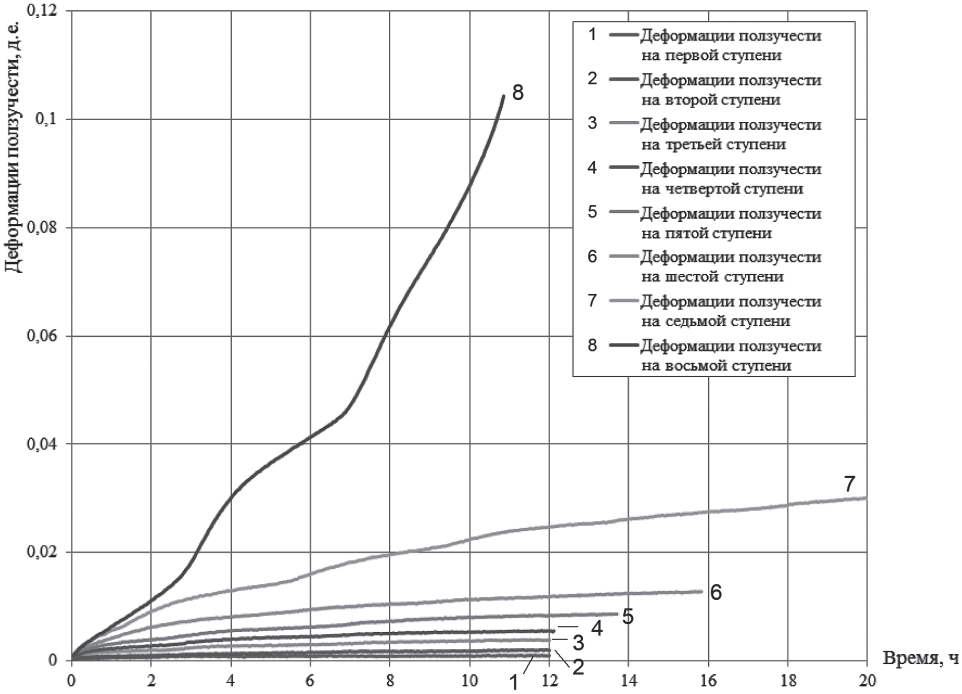

Рис. 5. Семейство кривых ползучести для многолетнемерзлого суглинка ямальской серии (испытания по схеме Кармана, бытовая нагрузка составляла 400 кПа, осевая нагрузка нарастала с шагом 100 кПа)

Fig. 5. A family of creep curves for permafrost loam of the Yamal series (tests according to the Karman scheme, transverse load was 400 kPa, axial load was increased with increments of 100 kPa)

пород также с учетом температуры залегания пород по схеме Кармана.

В связи с тем, что массив многолетнемерзлых пород, вмещающий подземные выработки, склонен к проявлению реологических свойств, при оценке его устойчивости также учитывались константы *A, m, n*, характеризующие деформации ползучести при различных уровнях напряжений. Реологическая модель имеет следующий вид:

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^c = A \cdot \left(\bar{\sigma}^c\right)^n \cdot t^m , \qquad (1)$$

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

Согласно теории Друкера-Прагера значение действующего напряжения определяется по формуле:

$$\bar{\sigma}^c = q - tg\varphi \cdot p , \qquad (2)$$

где $q = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\left(\sigma_1 - \sigma_2\right)^2 + \left(\sigma_2 - \sigma_3\right)^2 + \left(\sigma_3 - \sigma_1\right)^2}$ — интенсивность касательных напряжений; $p = \frac{1}{3} \cdot \left(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3\right)$ — среднее напряжение; σ_1, σ_2, σ_3 — главные действующие напряжения.

Параметры уравнений (1) и (2) определяются на основании обработки результатов прочностных и реологических испытаний образцов многолетнемерзлых пород в условиях трехосного сжатия. Пример реологических испытаний многолетнемерзлого суглинка при ступенчатом нагружении приведен на рис. 4.

Испытания образцов многолетнемерзлых пород из отобранных монолитов с территорий Бованенковского и Харасавейского месторождений проводились по схеме Кармана, бытовая нагрузка была зафиксирована, осевая нагрузка нарастала с постоянным для каждого образца шагом и действовала до достижения критерия стабилизации деформаций. Согласно критерию приращение осевых деформаций в течение 12 ч не должно превышать 0,5 мм. Выбранный критерий стабилизации деформаций позволил с достаточной степенью точности и минимальными затратами времени характеризовать реологические свойства образцов ММП. Основываясь на кривой деформирования образцов во времени, было получено семейство кривых ползучести для каждого выделенного РГЭ при различной интенсивности напряжений (рис. 5).

Обоснование критериев устойчивости подземного резервуара и результаты численного моделирования

Авторами была разработана методика оценки длительной устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах [14]. 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 ре-

зультатам расчета он является неустойчивым при его консервации сроком на три года по любой из выше предложенных технологий консервации.

Оценка устойчивости подземного резервуара проводится как по первой, так и по второй группе предельных состояний. В окрестности подземного резервуара контролируется развитие растягивающих напряжений, которые при превышении некого значения вызывают разрушение многолетнемерзлых пород.

В то же время, в окрестности резервуара оценивается развитие чрезмерных деформаций. Под термином чрезмерная деформация подразумевается суммарная составляющая компонентов деформаций по характеру деформирования вмещающих горных пород превышающая 20%, т.е.

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{plastic} + \varepsilon_{creep} > 20\%, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{elastic}$ — упругая деформация, д.е.; $\varepsilon_{plastic}$ — пластическая деформация, д.е.; ε_{creep} —деформация ползучести, д.е.

Допустимый размер области чрезмерных деформаций и зоны развития растягивающих напряжений в окрестности подземного резервуара определяется в зависимости от расположения резервуара в массиве. Вводится параметр Ω, который 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.

$$\Omega = 0{,}04 \cdot H/R \cdot h, \quad (4)$$

где H — высота выработки, м; R — максимальный полупролет выработки (радиус), м; h — глубина заложения кровли выработки, т.е. башмака обсадной колонны, м.

Также производится оценка оседания земной поверхности, вызванная развитием конвергенции подземного резервуара с течением времени при эксплуатации из-за проявления реологических свойств многолетнемерзлых пород. Оседания поверхности в обязательном порядке фиксируется на кустовых площадках с помощью маркшейдерских наблюдений с необходимой периодичностью в соответствии с проектом мониторинга.

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;
- 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;
- величина оседаний поверхности не превышает $0{,}025h$ (где h — глубина заложения выработки, т.е. башмака обсадной колонны).

В случае нахождения на дневной поверхности подрабатываемых объектов, величина осадки ограничивается предельно допустимыми значениями для подрабатываемых объектов.

В соответствии с предлагаемыми расчетными схемами первоначально проводились расчеты длительной устойчиво-

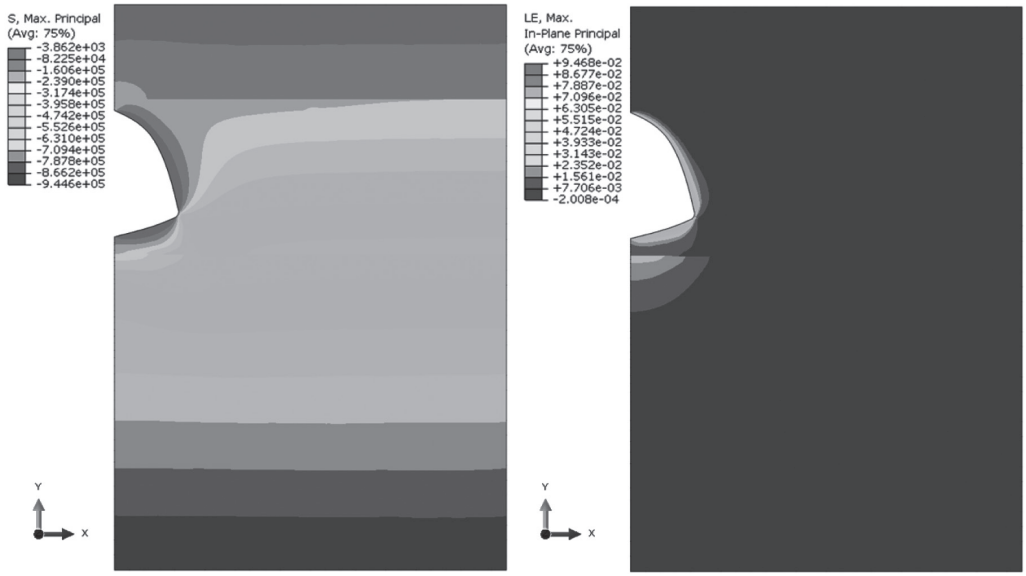

Рис. 6. Результаты численного моделирования для подземного резервуара объемом 2000 м³ на Харасавейском месторождении: слева показано распределение главных напряжений в массиве и в окрестности подземного резервуара в Па («–» — напряжения сжатия; «+» — напряжения растяжения), справа показано распределение общих деформаций в д.е.

Fig. 6. The results of numerical simulation for underground reservoir of capacity 2000 m³, Kharasaveiskoye-gas condensate field: left shows the distribution of the principal stresses in the array and in the vicinity of the underground reservoir in PA («–» — denotes compressive stress; «+» — tensile stress), the right shows the distribution of total strains in share units

сти проектных форм осесимметричных резервуаров в незаполненном состоянии для территории Харасавейского ГКМ и для форм, построенных на основе звуколокационной съемки, для Бованенковского ГКМ. 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. Вводится распределенная нагрузка на контур подземного резервуара, соответствующая гидростатическому давлению столба воды до устья 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.

Подземные резервуары, проектируемые на Харасавейском месторождении, по результатам численного моделирования были отнесены к первой категории устойчивости: зоны растягивающих напряжений в окрестности подземного резервуара не образуются, зоны, где общие деформации превышают 20%, не образуются, оседание земной поверхности не превышает критического значения (рис. 6).

Конвергенция подземных резервуаров при консервации в незаполненном состоянии сроком на 3 года может достигать 2—5%. В случае, если подземный резервуар по результатам расчета не соответствует первой категории

устойчивости, возможно изменение геометрических параметров резервуара, к примеру, уменьшение максимального радиуса, с целью повышения устойчивости, при условии технологической возможности и экономической обоснованности.

Подземные резервуары на Бованенковском НГКМ также на стадии проектирования были подвергнуты оценке устойчивости, все проектные формы относились в первой категории устойчивости. В процессе строительства из-за технологических сложностей и недостаточно разведанных геокриологических условий не для всех резервуаров была выдержана проектная форма. По результатам оценки, построенные подземные резервуары относятся к разным категориям устойчивости. Большинство резервуаров относятся к первой категории устойчивости — по результатам расчета допускается их консервация сроком на три года без заполнения, т.е. при атмосферном давлении. Следовательно, для большинства подземных резервуаров возможна эксплуатация по первоначальному регламенту без корректировки.

Некоторые резервуары из-за несовершенств формы или подработки перекрывающего массива не попадают в первую категорию устойчивости, для них производилась модификация геомеханической модели и заново проводился расчет. Такие резервуары относятся ко второй категории устойчивости — они является условно устойчивыми, по результатам расчета допускается их консервация сроком на три года с заполнением ПР водой до устья скважины или газом под избыточным давлением. Для таких подземных резервуаров требуется корректировка регламента эксплуатации с целью консервации только в заполненном состоянии при упомянутых условиях, либо с целью немедленного заполнения буровыми отходами.

Один из исследованных подземных резервуаров 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. Данный резервуар не подлежит эксплуатации и должен быть ликвидирован.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

2. *СП 123.13330.2012*. Свод правил. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. Актуализированная редакция СНиП 34-02-99.

3. *СТО* Газпром 2-3.5-153-2007. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки в непроницаемых и устойчивых горных породах. Нормы и правила проектирования, строительства и эксплуатации. — М.: ООО «Информационно-рекламный центр газовой промышленности», 2007. — 86 с.

4. *Баулин В.В., Дубиков Г.И., Аксенов В.И. и др.* Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал). — М.: ГЕОС, 2003. — 180 с.

5. *Воронова А. В.*, *Тропкин С. Н.*, *Журавлева Т. Ю.*, *Скворцов А. А.* Моделирование геомеханического поведения подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах / Инженерные системы-2015: Труды Международного форума: Москва, 6—7 апреля 2015 г. — С. 163—173.

6. *Rotta Loria A. F., Frigo B., Chiaia B.* A non-linear constitutive model for describing the mechanical behavior of frozen ground and permafrost // Cold regions science and technology. 2017. Vol. 133. pp. 63—69.

7. *Foriero A., Ladanyi B.* A streamline solution for rigid laterally loaded piles in permafrost // Canadian Geotechnical Journal. 1989. Vol. 26. pp. 568—574.

8. *Ladanyi B.* Creep of frozen slopes and ice-filled rock joints under temperature variation // Canadian journal of civil engineering. 2006. Vol. 33. pp. 719—725.

9. *Arenson L. U.*, *Johansen M. M.*, *Springman S. M.* Effects of volumetric ice content and strain rate on shear strength under triaxial conditions for frozen soil samples // Permafrost and periglacial processes. 2004. Vol. 15. pp. 261—271.

10. *Zhaohui (Joey) Yang, Benjamin Still, Xiaoxuan Ge*. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soil at high strain rate // Cold regions science and technology. 2015. Vol. 113. pp. 12—19.

11. Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. ГОСТ12248-2010. — М.: Стандартинформ, 2012. — 96 с.

12. *Drucker D. C.*, *Prager W.* Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of applied mathematics. 1952. Vol. 10. № 2. pp. 157—165.

13. *Helwany S.* Applied soil mechanics with ABAQUS applications. Wiley, 2007. 400 p.

14. *Воронова А. В.*, *Скворцов А. А.*, *Журавлева Т. Ю.* Методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах / Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Вып. 18. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24—25 марта 2016 г.). — С. 544—549. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Воронова Анастасия Вадимовна[1] — научный сотрудник,
e-mail: a.voronova@gazpromgeotech.ru,
Скворцов Алексей Александрович[1] — кандидат технических наук,
начальник отдела геомеханики,
[1] ООО «Газпром геотехнологии», 123290, г. Москва.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 9, pp. 35–46.

Stability of underground storage reservoirs in permafrost rocks

Voronova A.V., Researcher, e-mail: a.voronova@gazpromgeotech.ru,
Skvortsov A.A., Candidate of Technical Sciences,
Head of Department,
[1] «Gazprom geotechnology» LLC, 123290, Moscow, Russia.

Abstract. Mining operations in gas-condensate fields in the far north of Russia are faced with the problem of drilling waste disposal. To this effect, underground storage reservoirs are made in permafrost rocks by boring. The major condition of exploitation of such storages is their long-terms stability in the course of construction and operation. Stability of projected and constructed underground storage reservoirs at the Kharasavey and Bovanenkovo deposits was estimated in conformity with proposed procedure. The permafrost rock mass behavior under loading was described using the expanded Drucker–Prager viscoelastic model. The parameters to characterize physical and mechanical properties of rocks, required for modeling in SimuliaAbaqus environment, were obtained from processing of data of lab tests carried out under temperature of natural occurrence of permafrost. The presented stability criteria for shaftless storage reservoirs in permafrost rock mass are formulated based on the earlier research findings and with regard to operation experience. As a result of numerical modeling and stability

estimation, the projected and constructed underground storage reservoirs are given stability categories depending on which operational modes of the reservoirs are chosen.

Key words: stability estimation, underground storage reservoir, permafrost rocks, numerical modeling, geomechanics.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-35-46

REFERENCES

1. Aksyutin O. E., Kazaryan V. A., Ishkov A. G., Khloptsov V. G., Teplov M. K., KHrulev A. S., Savich O. I., Surin S. D. Stroitel'stvo i ekspluatatsiya rezervuarov v mnogoletnemerzlykh osadochnykh porodakh [Construction and operation of reservoirs in permafrost sedimentary rocks], Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2013, 432 p.

2. *SP 123.13330.2012. Svod pravil. Podzemnye khranilishcha gaza, nefti i produktov ikh pererabotki. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 34-02-99* [SP 123.13330.2012. A set of rules. Underground storage of gas, oil and refined products. The updated edition of SNiP 34-02-99].

3. *STO Gazprom 2-3.5-153-2007. Podzemnye khranilishcha gaza, nefti i produktov ikh pererabotki v nepronitsaemykh i ustoychivykh gornykh porodakh. Normy i pravila proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii* [Underground storage of gas, oil and refined products in impermeable and resistant rocks. Rules and regulations for the design, construction and operation STO Gazprom 2-3.5-153-2007], Moscow, OOO «Informatsionno-reklamnyy tsentr gazovoy promyshlennosti», 2007, 86 p.

4. Baulin V. V., Dubikov G. I., Aksenov V. I. *Geokriologicheskie usloviya Kharasaveyskogo i Kruzenshternovskogo gazokondensatnykh mestorozhdeniy (poluostrov Yamal)* [Permafrost conditions of the Kharasaveiskoe andKruzenshternovskoye gas condensate fields (the Yamal Peninsula)], Moscow, GEOS, 2003, 180 p.

5. Voronova A. V., Tropkin S. N., ZHuravleva T. Yu., Skvortsov A. A. Modelirovanie geomekhanicheskogo povedeniya podzemnykh rezervuarov v mnogoletnemerzlykh porodakh [Modeling of mechanical behavior of underground reservoirs in permafrost]. *Inzhenernye sistemy-2015: Trudy Mezhdunarodnogo foruma*: Moscow, 6—7 April 2015, pp. 163—173. [In Russ].

6. Rotta Loria A. F., Frigo B., Chiaia B. A non-linear constitutive model for describing the mechanical behavior of frozen ground and permafrost. *Cold regions science and technology*. 2017. Vol. 133. pp. 63—69.

7. Foriero A., Ladanyi B. A streamline solution for rigid laterally loaded piles in permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*. 1989. Vol. 26. pp. 568—574.

8. Ladanyi B. Creep of frozen slopes and ice-filled rock joints under temperature variation. *Canadian journal of civil engineering*. 2006. Vol. 33. pp. 719—725.

9. Arenson L. U., Johansen M. M., Springman S. M. Effects of volumetric ice content and strain rate on shear strength under triaxial conditions for frozen soil samples. *Permafrost and periglacial processes*. 2004. Vol. 15. pp. 261—271.

10. Zhaohui (Joey) Yang, Benjamin Still, Xiaoxuan Ge. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soil at high strain rate. *Cold regions science and technology*. 2015. Vol. 113. pp. 12—19.

11. Mezhgosudarstvennyy standart. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemosti. GOST 12248-2010 [Interstate standard. Soils. Methods of laboratory determination of strength characteristics and deformability. 12248-2010], Moscow, Standartinform, 2012, 96 p.

12. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*. 1952. Vol. 10, no 2. pp. 157—165.

13. Helwany S. *Applied soil mechanics with ABAQUS applications*. Wiley, 2007. 400 p.

14. Voronova A. V., Skvortsov A. A., Zhuravleva T. Yu. Metodika otsenki ustoychivosti podzemnykh rezervuarov v mnogoletnemerzlykh porodakh [Methods of assessing the stability of underground reservoirs in permafrost]. Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Fundamental'nye problemy i prikladnye zadachi. Issue 18. *Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii* (24—25 March 2016), pp. 544—549. [In Russ].