

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

А. В. Воронова, С. Н. Тропкин, Т. Ю. Журавлева, А. А. Скворцов

<sup>1</sup>ООО «Газпром геотехнологии», Москва

В процессе разработки газоконденсатных месторождений на Крайнем севере России возникают проблемы захоронения отходов бурения. В качестве хранилища буровых отходов используются подземные резервуары в многолетнемерзлых породах, сооруженные методом размыва. Главным условием эксплуатации подобных хранилищ является их длительная устойчивость в процессе строительства, простоя и заполнения хранимым продуктом до момента ликвидации скважины.

Для моделирования устойчивости подземных выработок был применен программный комплекс SIMULIA Abaqus. Оценивалась устойчивость ранее возведенных подземных резервуаров, построенных на едином кусте скважин в массиве многолетнемерзлых пород. Создание и эксплуатация резервуаров моделировалась в соответствии с реальной историей строительства и заполнения буровыми отходами. Были учтены продолжительности всех этапов жизненного цикла резервуаров и особенности распределения давления в них во времени.

## Введение

В настоящее время ООО «Газпром» и его дочерние общества активно разрабатывают Мегапроект Ямал. Одним из основных объектов этого проекта является Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение. 23 октября 2012 года введен в эксплуатацию первый пусковой комплекс Бованенковского месторождения, в состав которого входят установка комплексной подготовки газа мощностью 30 млрд м<sup>3</sup> газа в год и 60 скважин.

При бурении газодобывающих скважин 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 для захоронения буровых отходов. Подземные резервуары строятся кустовым способом на одной площадке бурения. 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.

## Постановка задачи

В настоящее время накоплено большое количество данных по строительству скважинных подземных резервуаров и их поведению во время всего жизненного цикла на Бованенковском НГКМ. Главным условием эксплуатации подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах является их длительная устойчивость на протяжении всего времени существования.

Цель данной работы – оценить устойчивость ранее созданных четырех подземных резервуаров, расположенных на единой кустовой площадке в массиве многолетнемерзлых пород, учитывая реальную историю создания и эксплуатации данных резервуаров.

Подземные резервуары ПР-1, ПР-2, ПР-3, ПР-4 расположены на кустовой площадке на территории Бованенковского НГКМ. Скважины, на которых созданы ПР, вертикальны, расстояния между устьями скважин составляет 50 м. Резервуары строились в многолетнемерзлых песках. После окончания строительства была произведена звуколокационная съемка, в результате которой были получены отметки кровли и подошвы, а также форма каждого подземного резервуара (рисунок 1).

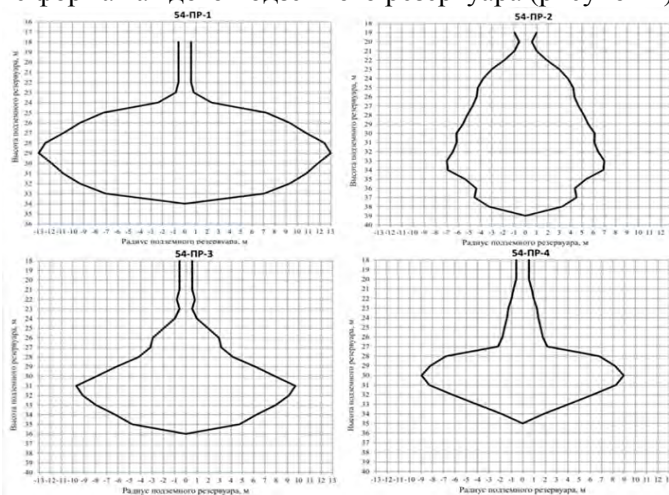


Рис. 1 – Формы подземных резервуаров ПР-1, ПР-2, ПР-3, ПР-4

При расчете с помощью программного комплекса SIMULIA Abaqus моделировался однородный массив многолетнемерзлого песка с четырьмя подземными емкостями. Размеры массива определяются исходя из зоны влияния одиночной выработки – изменение напряженно-деформированного состояния при строительстве распространяется на расстояние трех максимальных пролетов от оси выработки. Следовательно, от оси каждой скважины до вертикальных границ массива расстояние должно составлять минимум 78 м. Расчетная область имеет размеры 206 x 206 x 99 м и представлена на рисунке 2.

Данные резервуары были построены и заполнены в течение полугода, но этапы строительства и эксплуатации для каждого резервуара имеют свои временные рамки. Наиболее важно, что строительство резервуаров начато не одновременно, а последовательно – сначала ПР-3, далее ПР-1, потом ПР-4 и последним начато строительство ПР-2. Кроме того, для каждого резервуара периоды строительства, откачки водо-песчаной смеси и закачки буровых отходов различны. История строительства и эксплуатации резервуаров представлена на рисунке 3.

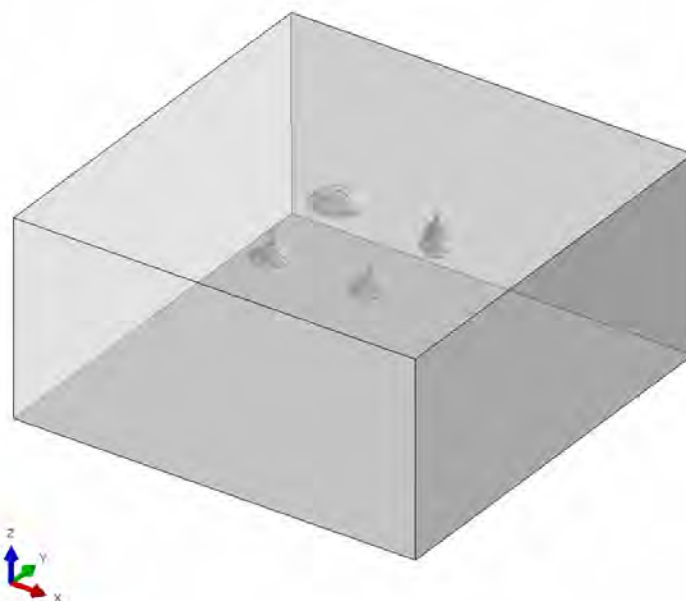


Рис. 2 – Форма и положение подземных резервуаров в массиве многолетнемерзлых пород

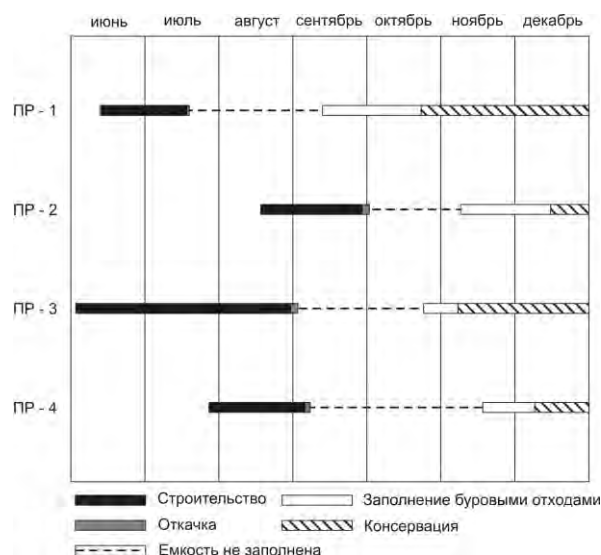


Рис. 3 – Хронология строительства и эксплуатации подземных резервуаров

При расчете было принято упрощение, что весь массив моделируется однородным изотропным материалом характеризующим поведение многолетнемерзлых пород. Многолетнемерзлые породы (ММП) обладают ярко выраженными реологическими свойствами – способностью породы деформироваться во времени под постоянно действующей нагрузкой. Для описания ММП использовалась упруго-вязкопластичная модель материала Extended Drucker Prager. Данная модель позволяет достаточно корректно описывать поведение ММП при различных уровнях напряжений. Параметры для используемой модели материала определяются на основании экспериментов по изучению физико-механических и реологических свойств ММП в лабораторных условиях.

Время создания каждого резервуара определялось согласно временной схеме (рисунок 3). Было получено четыре временных точки – время создания резервуара ПР-3, далее время создания резервуара ПР-1, далее – ПР-4 и ПР-2. В момент времени начала строительства каждого резервуара происходило изменение исходной модели – из расчета «отключалась» область массива многолетнемерзлых пород, имеющая форму создаваемого резервуара.

Также в этот момент времени к поверхности «появившегося» резервуара прикладывалась гидростатическая нагрузка, рассчитанная в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.

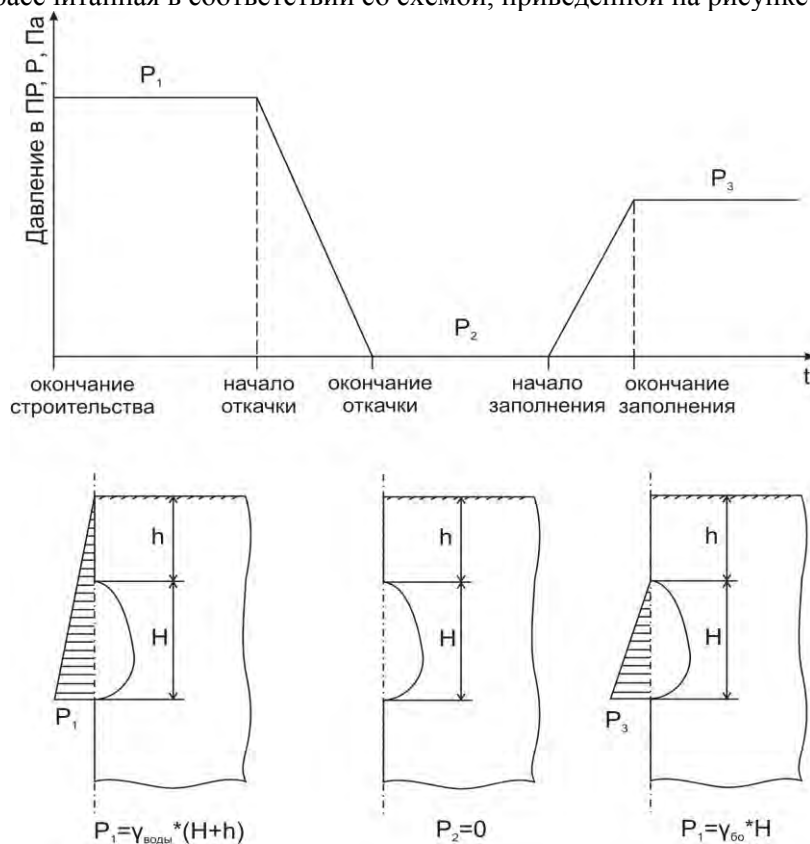


Рис. 4 – Давление в подземном резервуаре в процессе эксплуатации

(на рисунке:  $P_1, P_2, P_3$  – давление в резервуаре;  $H$  – высота резервуара;  $h$  – глубина заложения кровли;  $\gamma_{\text{воды}}$  – объемный вес воды;  $\gamma_{\text{бг}}$  – объемный вес буровых отходов)

На протяжении всего расчета учитывается действие гравитационных сил на массив многолетнемерзлых пород. Граничными условиями закреплены вертикальные грани расчетной области в направлении перпендикулярных осей соответственно, также ограничено перемещение нижней горизонтальной грани расчетной области по вертикали.

В качестве начального напряженно-деформированного состояния в массиве задавалось геостатическое поле напряжений, вызванное гравитационными объемными силами.

Одной из наиболее трудозатратных операций при проведении расчета стало построение адекватной конечно-элементной сетки, удовлетворяющей требованиям анализа. К данным требованиям можно отнести:

- создание сгущений сетки в зонах на поверхности и вблизи поверхностей выработки;
- отсутствие «искаженных» элементов;
- общее количество элементов не должно превышать некоего значения, определенного исходя из имеющихся вычислительных мощностей.

Создание в сетке изначально искаженных элементов при проведении расчета может вызвать чрезмерное и не соответствующее реальным условиям деформирование данных элементов, что в свою очередь может привести к несходимости и преждевременной остановке расчета. Поэтому, с помощью встроенных инструментов была выполнена диагностика на предмет отсутствия искаженных элементов.

Для построения локальных сгущений и повышения качества сетки наиболее удобной техникой стала техника Seed Edges с включенной опцией Allow seeds to increase or decrease. Данная опция позволяет сеткопостроителю не привязываться жестко к заданному размеру элементов, а варьировать им в зависимости от сложности описываемого контура геометрии.

В результате построений общая размерность задачи составила 910 000 элементов, содержащая 0,03% искаженных элементов, расположенных на удалении от предполагаемых зон значительных деформаций. Конечно-элементная сетка, построенная на массиве многолетнемерзлых пород, показана на рисунке 5.

Для проведения расчёта использовалось следующее аппаратное обеспечение: Рабочая станция на базе Intel Xeon E5-1650 3.5 GHz, 64 Gb RAM, 512 SSD. Для расчёта использовалось 6 ядер. В результате требуемый объем оперативной памяти составил 62 Gb – 43 Gb в зависимости от шага расчёта. Общее время решения задачи заняло ~110 часов.

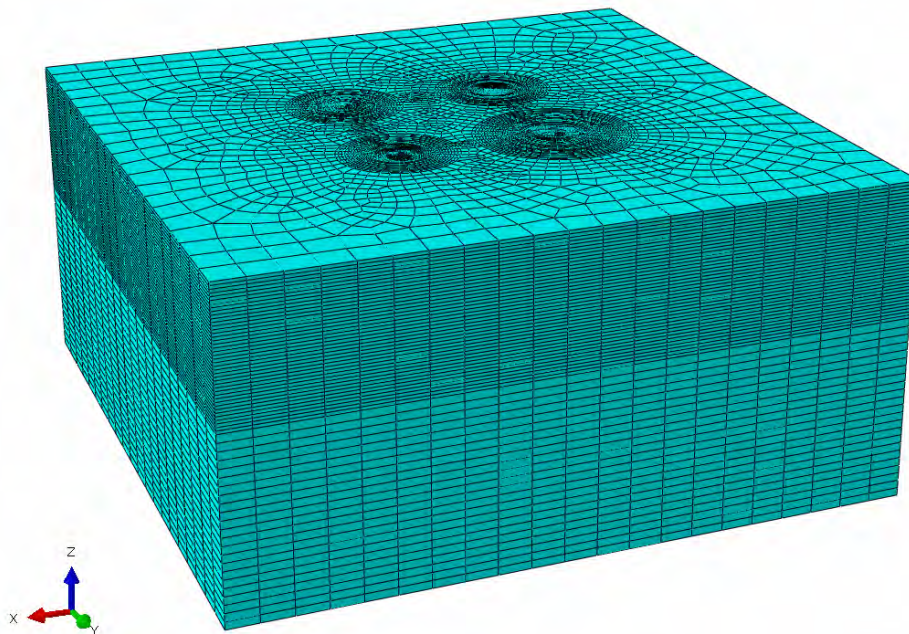


Рис.5 – Конечно-элементная сетка массива многолетнемерзлых пород

## Результаты численного моделирования

При численном моделировании было исследовано изменение напряженно-деформированного состояния массива многолетнемерзлых пород в течении полутора лет – шесть месяцев на создание и заполнение всех емкостей, и еще год их нахождения в массиве после всех изменений. Главной задачей данного расчета являлась оценка устойчивости подземных емкостей в период эксплуатации и консервации.

Оценка устойчивости подземных резервуаров проводилась в соответствии с действующими нормативами [1]:

- не вся поверхность выработки-емкости принадлежит области запредельного деформирования (ОЗД), максимальный размер ОЗД в кровле в направлении, нормальном поверхности выработки-емкости, не превышает  $0,03 L$ , где  $L$  – пролет (максимальный диаметр) выработки;
- растягивающие напряжения в породном массиве не превышают прочности породы при растяжении, развитие области растягивающих напряжений вглубь массива ограничено величиной  $0,04 L$ ;
- максимальное опускание кровли не превышает  $0,0175 L$ .

Область запредельного деформирования возникает в части массива, где возникшие деформации превышают предельные значения, полученные в результате обработки эксперимента на ползучесть многолетнемерзлой породы. В результате проведенного расчета было получено, что области запредельного деформирования массива многолетнемерзлых пород отсутствуют на протяжении всего исследуемого интервала времени.

Области распространения растягивающих напряжений возникают в окрестности подземного резервуара преимущественно в период нахождения резервуара незаполненным состоянием. Но размер областей не превышает критерильных значений, а уровень растягивающих напряжений на порядок меньше прочности многолетнемерзлых пород при растяжении (рисунок 6, 7).

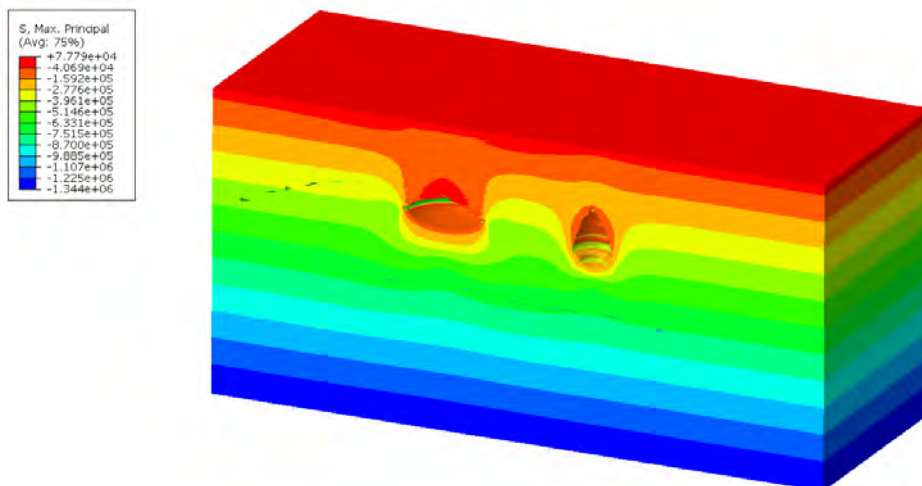


Рис.6 – Распределение главных максимальных напряжений в массиве многолетнемерзлых пород (сечение плоскостью, проходящей через оси скважин резервуаров ПР-1 и ПР-2)

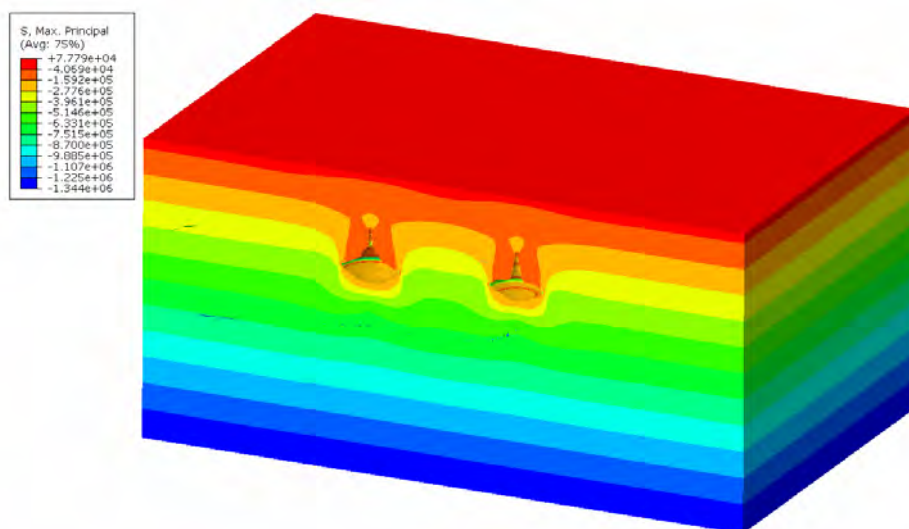


Рис.7 – Распределение главных максимальных напряжений в массиве многолетнемерзлых пород (сечение плоскостью, проходящей через оси скважин резервуаров ПР-3 и ПР-4)

В данном расчете наиболее важным с позиции оценки устойчивости подземного резервуара является критерий по значению максимального опускания кровли емкости, так как именно он является основным диагностическим признаком в реальных условиях.

Полученные в процессе численного моделирования оседания кровли подземных емкостей ПР-1 – ПР-4 представлены на рисунках 8 – 11. Также на рисунках показано давление в подземном резервуаре в процессе его жизненного цикла. На рисунках показано изменение давления в подземном резервуаре, полученные в результате расчета оседания кровли резервуара, а также максимально допустимые оседания кровли резервуара исходя из критерия устойчивости (критериальная кривая).

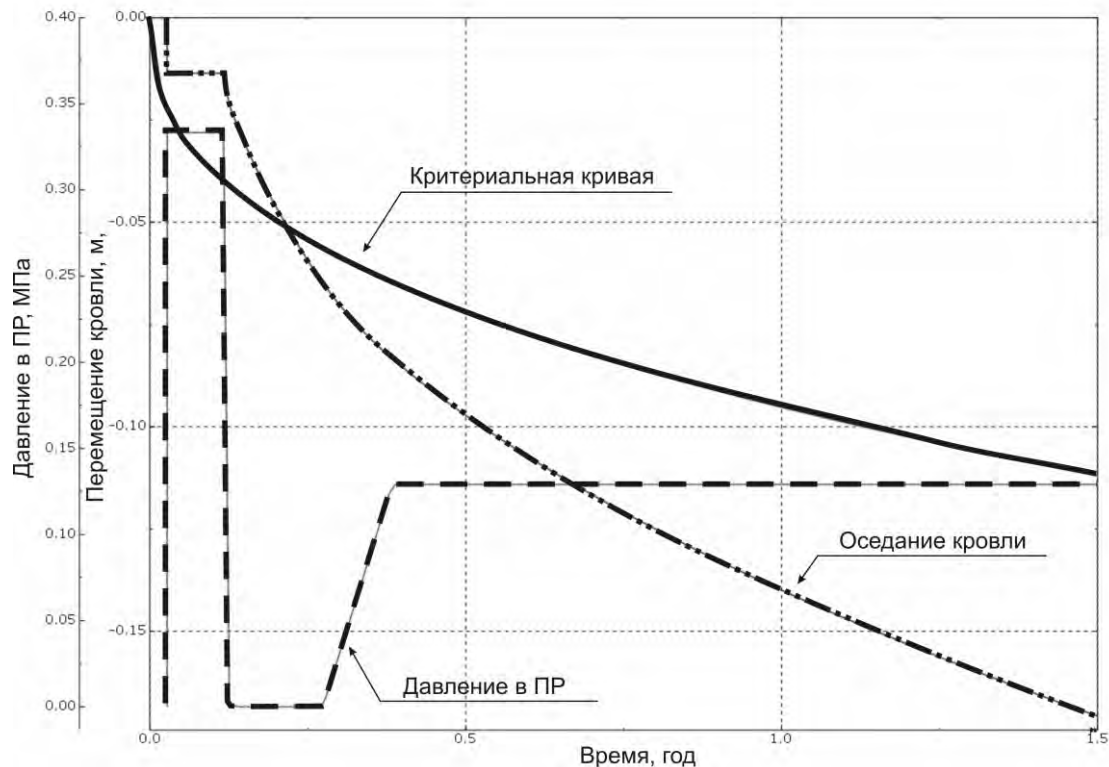


Рис. 8 – Оседание кровли резервуара ПР-1 в процессе его жизненного цикла

Подземный резервуар ПР-1 имеет наиболее неблагоприятную с точки зрения оценки устойчивости форму. Как видно из рисунка 8 оседания кровли резервуара в период строительства не превышают максимально допустимые, следовательно, подземный резервуар ПР-1 является устойчивым при данных условиях. После «откачки» из него водно-песчаной смеси кровля резервуара ПР-1 начинает интенсивно деформироваться и в скором времени резервуар теряет устойчивость – значение полученного оседания кровли резервуара превышает критериальное значение в данный момент времени.

Кривая оседания кровли емкости, полученная при расчете, даже в период, когда емкость заполнена буровыми отходами, имеет больший угол наклона, чем критериальная кривая. Из этого следует, что подземный резервуар такой формы будет неустойчив даже в стадии консервации, он требует специальных мероприятий по ликвидации с целью недопущения оседаний земной поверхности.

Конвергенция подземного резервуара ПР-1, т.е. уменьшение его объема за счет проявления реологических процессов в многолетнемерзлом массиве, за расчетный период составляет 2,2%, что является значительным уменьшением объема резервуара.

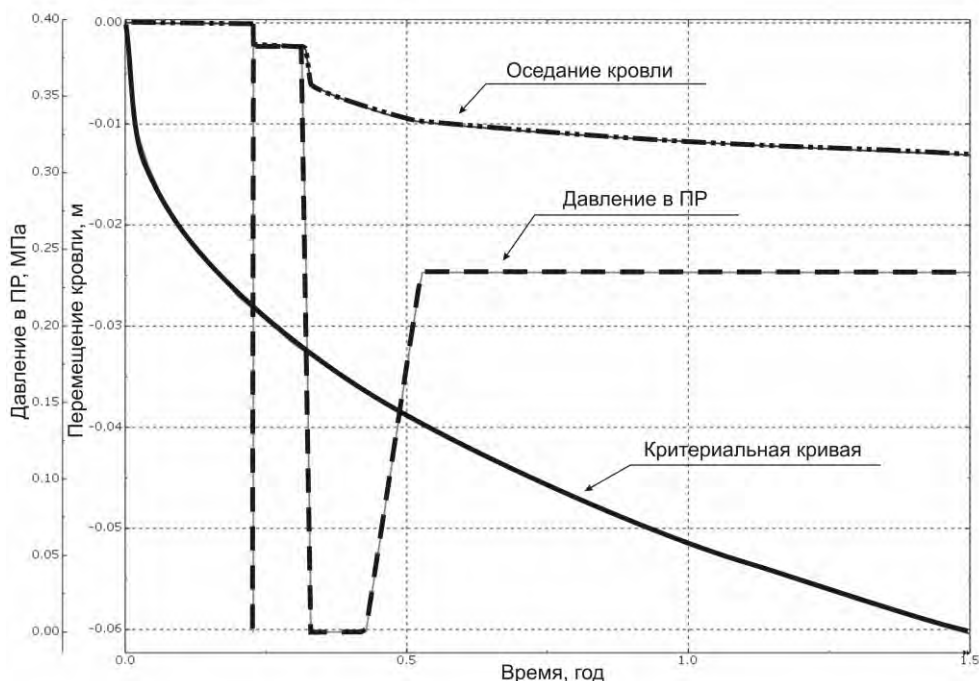


Рис. 9 – Оседание кровли резервуара ПР-2 в процессе его жизненного цикла

Подземный резервуар ПР-2 имеет самый малый объем и наиболее правильную форму. Судя по рисунку 9, данный подземный резервуар является устойчивым на протяжении всего жизненного цикла.

Кроме того, кривая полученных оседаний кровли резервуара в период, когда емкость заполнена буровыми отходами, имеет значительно меньший угол наклона, чем критериальная кривая. Следовательно, данный резервуар сохранит устойчивость и при более длительном периоде хранения буровых отходов без дополнительных ликвидационных мероприятий.

Конвергенция подземного резервуара ПР-2 за полтора года не превышает 0,5%, что также свидетельствует о его устойчивости.

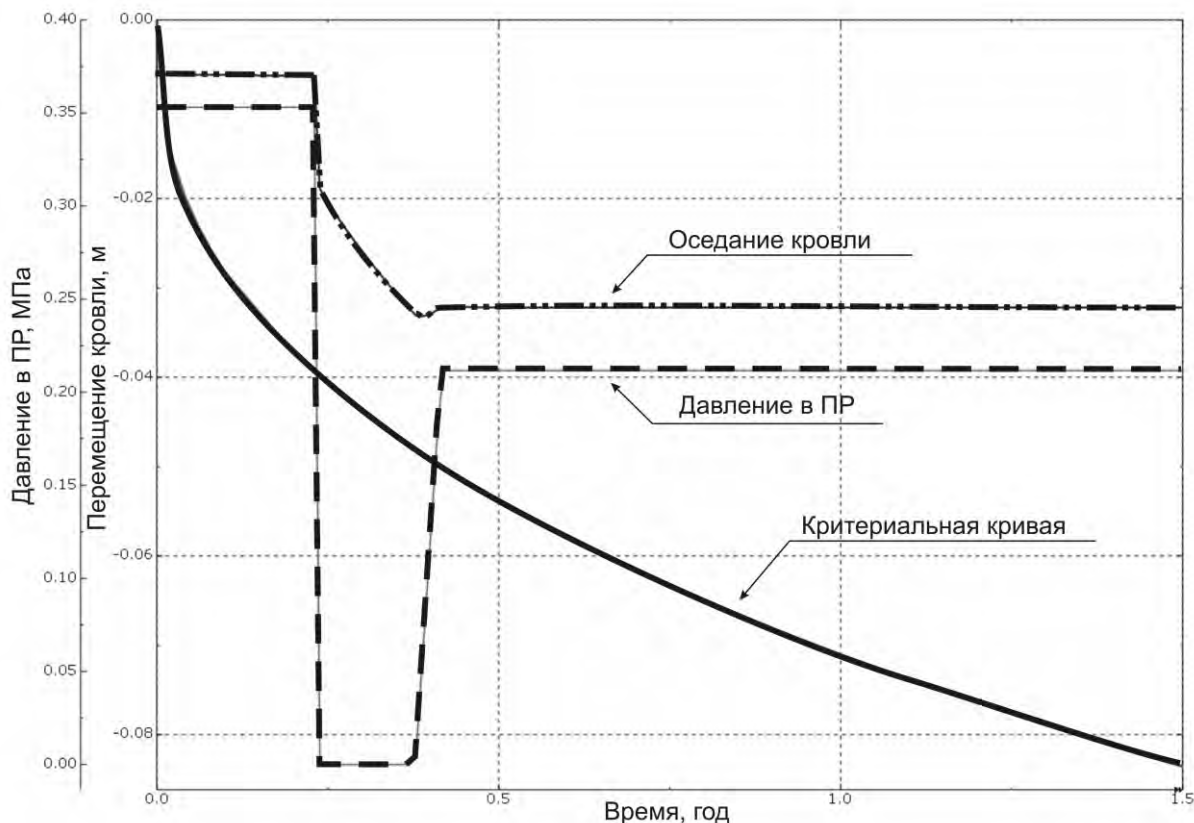


Рис. 10 – Оседание кровли резервуара ПР-3 в процессе его жизненного цикла

Подземные резервуары ПР-3 и ПР-4 являются устойчивыми в соответствии с рисунками 10 и 11.

Важно отметить, что угол наклона кривой оседаний в период, когда давление в резервуаре отсутствует, превышает угол наклона критериальной кривой. Следовательно, при длительном нахождении резервуаров в незаполненном виде, они могут потерять устойчивость. Тогда как, при заполнении резервуаров буровыми отходами, кривая оседаний становится горизонтальной, соответственно резервуары находятся в устойчивом равновесии.

Конвергенция подземных резервуаров ПР-3 и ПР-4 за полтора года имеет близкие значения – она не превышает 0,9%, что говорит об относительной устойчивости данных резервуаров.

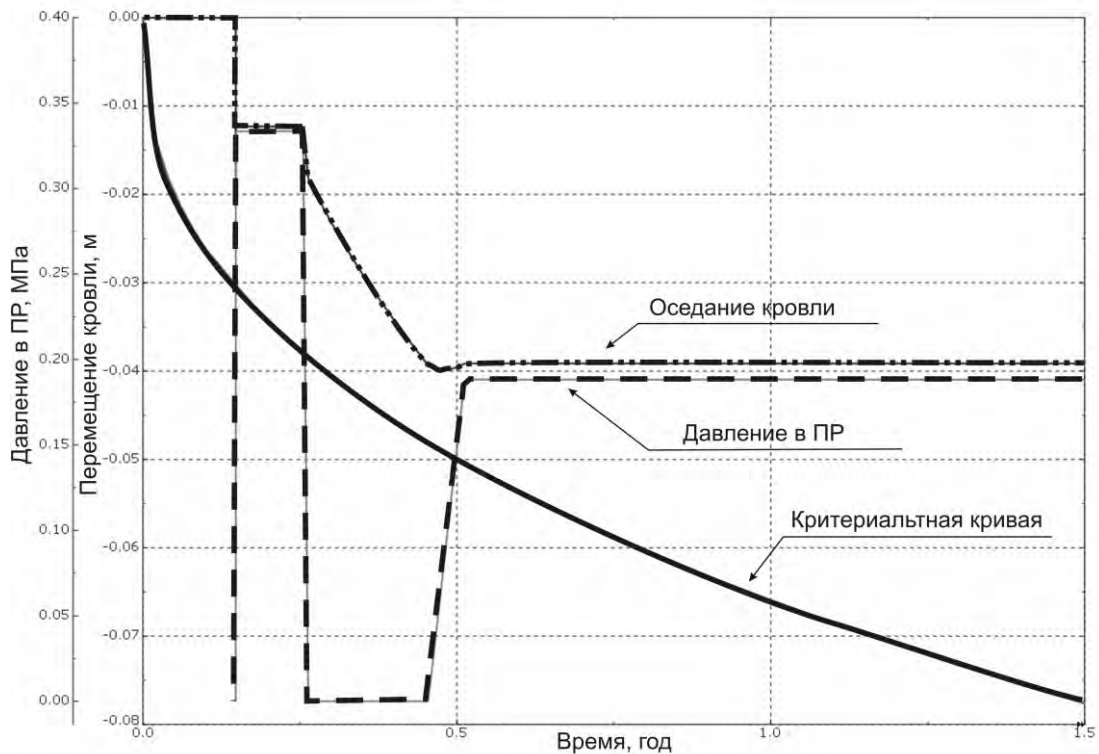


Рис. 11 – Оседание кровли резервуара ПР-4 в процессе его жизненного цикла

## Выводы

Устойчивость подземного резервуара в многолетнемерзлых породах определяется в первую очередь его формой. При численном моделировании геомеханического поведения подземных резервуаров, построенных на едином кусте скважин, данные резервуары имеют сходные условия расположения в массиве. Но резервуар ПР-1 отличается довольно большим максимальным пролетом при относительно малой высоте резервуара, что определяет его неустойчивое состояние при эксплуатации в отличие от резервуаров ПР-2, ПР-3 и ПР-4. В процессе строительства резервуаров требуется регулярный контроль с помощью геофизических методов с целью соответствия проектной форме.

Также значительное влияние на устойчивость подземного резервуара оказывает история его создания и эксплуатации, особенно длительность периода нахождения резервуара в незаполненном состоянии. При падении давления в резервуаре происходит интенсификация реологических процессов в окружающем массиве, могут возникнуть растягивающие напряжения в окрестности выработки. В случае, если растягивающие напряжения в кровле выработки превысят прочность многолетнемерзлых пород при растяжении, возможны образование вывалов породы и повреждение скважинного оборудования или интенсификация деформационных процессов, которые могут привести к обрушению кровли резервуара. Кроме того, в это время происходит прогрессивный рост значений оседания кровли выработки, который можно стабилизировать максимально быстрой закачкой в подземный резервуар буровых отходов. Период нахождения резервуара в пустом состоянии следует по возможности минимизировать, так как при длительном периоде простоя резервуар может потерять устойчивость.

## Список литературы

Свод правил «Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. Актуализированная редакция». СП 123.13330.2012. –М., 2013.