

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

А. С. Мосина¹, А. Ю. Мирный¹, А. А. Скворцов², С. Д. Сурин²

¹ МГУ им. М. В. Ломоносова, кафедра инженерной и экологической геологии,
Москва, Россия

² ООО «Газпром геотехнологии», Москва, Россия

Аннотация: Представлен анализ действующей методики оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах. Установлено, что на настоящий момент не прогнозируется разрушение подземного резервуара с течением времени, так как отсутствует критерий оценки такой возможности. Прогноз состояния подземного резервуара производят без учета важнейшего показателя пригодности для целей хранения/захоронения нефтепродуктов – потери полезного объема резервуара. В связи с этим применение действующей методики не позволяет в полном объеме произвести прогноз устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах. В статье представлен вариант корректировки методики оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах. Предлагается проведение прогноза состояния подземных резервуаров в два этапа. На первом этапе определяется возможность наступления аварийной ситуации для подземного резервуара, которая фиксируется по размеру зоны пластического течения породы. На втором этапе прогнозируется снижение пригодности подземного резервуара для целей хранения/захоронения нефтепродуктов (эксплуатационной пригодности). Установлено, что снижение эксплуатационной пригодности происходит в результате конвергенции стенок выработки под действием ползучести мерзлых грунтов и вывалов грунта из кровли и стенок выработки при превышении предельного значения прочности мерзлых грунтов. С учетом вышеприведенных процессов определено, что снижение эксплуатационной пригодности подземных резервуаров можно оценить количественно, используя такие критерии, как перемещение кровли резервуара и снижение его полезного объема с течением времени. На основании скорректированных критериев предложено подразделение подземных резервуаров по категориям устойчивости. Для каждой категории устойчивости подземного резервуара определен метод дальнейшей эксплуатации. Рассмотрен вариант последовательного заполнения подземных резервуаров на основе прогнозируемого уменьшения их полезного объема.

Ключевые слова: надежность сооружений, напряженно-деформированное состояние, численные методы, подземные резервуары, предельное состояние, многолетнемерзлые породы, скважинная гидродобыча, подземное хранение.

Для цитирования: Мосина А. С., Мирный А. Ю., Скворцов А. А., Skvortsov A. A., Surin С. Д. Методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-1. – С. 223–237. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_223.

Procedure for stability assessment of underground storage cavities in permafrost rocks

A. S. Mosina¹, A. Y. Mirnyy¹, A. A. Skvortsov², S. D. Surin²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Gazprom Geotechnology LLC, Moscow, Russia

Abstract: The article analyzes the procedure now in force for the stability assessment of underground storage cavities in permafrost rocks. It is found that the procedure lacks damage evaluation of an underground cavity with time as there is no adequate criterion. Failure prediction of an underground cavity disregards the major appropriateness index of a cavity for storage/disposal of petroleum products—loss of active storage capacity. In this regard, the current procedure offers an incomplete stability prediction of underground storage cavities in permafrost rocks. This study presents a modification of the procedure for the stability assessment of underground storage cavities in permafrost rocks. It is proposed to implement stability prediction in two stages. The first stage is the emergency risk assessment for an underground cavity based on the plastic yield zone size in rocks. The second stage is the estimate of impaired serviceability of an underground cavity for storage/disposal of petroleum products (operational integrity). The impaired serviceability is a result of the cavity wall convergence under the action of frozen rock creep and rock fall from roof and sidewalls when the ultimate strength of frozen rocks is overrun. Considering the above-specified processes, it is found that the impaired serviceability of underground storage cavities can be evaluated using such criteria as the roof displacement and the loss of active storage capacity of an underground cavity with time. Based on the corrected criteria, a stability classification is proposed for underground storage cavities. Methods of further operation are determined for each stability category of underground cavities. A case-study of sequential fill of underground cavities based on the predicted loss in their active storage capacity is discussed.

Key words: structure reliability, stress–strain behavior, numerical methods, underground storage cavities, limit state, permafrost rocks, hydraulic borehole mining, underground storage.

For citation: Mosina A. S., Mirnyy A. Y., Skvortsov A. A., Surin S. D. Procedure for stability assessment of underground storage cavities in permafrost rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3-1):223–237. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_223.

Введение

Многолетнемерзлые породы давно используются в промышленных и хозяйственных целях. В их толще сооружают склады, бункеры и хранилища. Одной из перспективных и успешно применяемых технологий является строительство и эксплуатация подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах. Подземные резервуары строят методом скважинной гидродобычи, который позволяет путем воднотеплового разрушения создать устойчивую емкость необходимого объема. Их

используют для хранения нефтепродуктов, а также для конечного захоронения буровых отходов [1].

При строительстве и эксплуатации подземных резервуаров происходит изменение естественного напряженного состояния массива мерзлых пород. В результате чего возможны чрезмерные оседания и провалы на земной поверхности, уменьшение объема резервуара и др. Поэтому необходим точный прогноз устойчивости резервуара и принятие эффективных управляющих решений, которые позволят

снизить влияние негативных процессов на резервуар.

Под устойчивостью подземных резервуаров понимается их способность функционировать в определенных условиях с заданными параметрами в течение требуемого срока эксплуатации [7].

Прогноз состояния резервуара осуществляют путем оценки его длительной устойчивости в мерзлой породе. С этой целью производят расчет напряженно-деформированного состояния массива пород на несколько десятков лет вперед, сравнивают полученные картины распределения напряжений и деформаций с установленными предельными значениями. По результатам расчетов каждому подземному резервуару присваивают категорию состояния, которая показывает какой режим дальнейшей эксплуатации позволит минимизировать влияние негативных геомеханических процессов.

Действующая методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах приведена в СП 123.13330.2012 «Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки». В приложении А указаны критерии устойчивости подземного резервуара, но отсутствует информация о категоричности подземных резервуаров, о методах повышения их устойчивости и др. Руководствуясь данным документом, трудно провести точный прогноз состояния подземного резервуара в мерзлых породах и на его основании принять управляющие решения. Необходимо добавить, что в нормативных документах говорится об «оценке устойчивости» подземных резервуаров. Однако корректнее использовать понятие «прогноза устойчивости», так как в данной методике рассматривается возможное состояние резервуара в будущем. Поэтому

во избежание путаницы, здесь и далее говорится именно о прогнозе устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах.

В связи с этим целью данной работы была разработка программы корректировки действующей методики оценки устойчивости. Для этого были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать действующую методику оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах.
2. Представить новые оценочные критерии устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах.
3. Рассмотреть методы эксплуатации резервуаров для снижения развития негативных геомеханических процессов.

Технология строительства подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах

Строительство подземных резервуаров производят следующим образом. С поверхности бурят технологическую скважину с обсадкой и цементацией затрубного пространства до проектируемой кровли выработки. До начала размыва резервуара монтируется скважинный снаряд, служащий для подачи теплой воды, сжатого воздуха, пара и подъема пульпы. Теплоноситель в виде воды, которая нагревается от солнечной радиации или с помощью парогенератора, подается по водоводу в толщу мерзлых песчаных пород [2]. Под обогревающим действием воды многолетнемерзлые породы переходят в талое состояние и опускаются на дно образующейся выработки-емкости. По межтрубью центральной колонны происходит отведение образовавшейся пульпы. Подъем смеси производится эрлифтным способом. Формирование резервуара происходит путем посте-

пенного изменения уровня воды. После достижения необходимого объема резервуар испытывают на герметичность. Далее демонтируют технологические колонны и оборудуют подземный резервуар эксплуатационными колоннами, герметичными оголовками с трубами и измерительными приборами [3]. После проведения звуколокационных исследований из резервуара откачивают воду и принимают его в эксплуатацию (рис. 1).

Анализ действующей методики оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах

Прогноз устойчивости подземных резервуаров производят в две стадии: проектную и эксплуатационную. На проектной стадии, исходя из гео-

логического строения массива горных пород, экономических показателей и геокриологических условий подбирают наиболее устойчивую форму резервуара. На эксплуатационной стадии оценивают форму построенного резервуара по результатам звуколокационных исследований и выбирают метод дальнейшей эксплуатации. На каждой стадии прогноз устойчивости производят при помощи расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) многолетнемерзлых пород вокруг выработки. Его проводят численными методами моделирования (МКЭ, МКР и т. д.) или с использованием аналитических решений либо эмпирических соотношений [4].

В установившейся практике расчет НДС массива, вмещающего подземный резервуар, осуществляют числен-

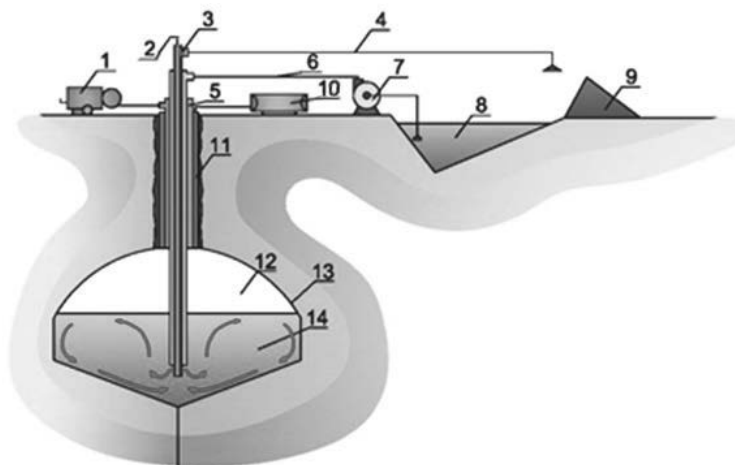


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема строительства подземного резервуара: 1 – компрессор; 2 – внешняя подвесная (водоподающая) колонна; 3 – центральная подвесная (пульпоотборная) колонна; 4 – пульпоотводная линия; 5 – промежуточная подвесная колонна для закачки газа; 6 – водопровод; 7 – водяной насос; 8 – водоем; 9 – гидроствал; 10 – холодильная установка; 11 – основная обсадная колонна; 12 – газ (воздух); 13 – выработка-емкость; 14 – водогрунтовая смесь – пульпа [1]

Fig. 1. Principal technological scheme of borehole underground reservoir construction: 1 – compressor; 2 – external suspended (water-fed) column; 3 – central suspended (slurry intake) column; 4 – slurry discharge line; 5 – intermediate suspended column; 6 – water pipeline; 7 – water pump; 8 – water reservoir; 9 – hydraulic-mine dump; 10 – refrigeration unit; 11 – main casing string; 12 – air; 13 – working-reservoir (cavity); 14 – soil-water mixture – slurry [1]

ными методами (методом конечных элементов), позволяющими учесть нелинейность поведения геоматериала, сложную геометрическую форму, структурные особенности горных пород и т. д. [5]. Расчет НДС проводят в программном комплексе Simulia Abaqus, хорошо зарекомендовавшем себя в решении геотехнических и геомеханических задач. Для оценки механического поведения массива используют модели, учитывающие упругие, пластические и реологические свойства, проявляющиеся в мерзлой породе [6]. В рассматриваемую область включают слоистый массив пород с формой подземного резервуара по результатам звуколокационных исследований. Задача решается в осесимметричной постановке. В результате расчетов определяют все компоненты тензоров напряжений и деформаций породы в точках исследуемой области [7]. Полученные количественные показатели НДС оценивают с использованием выбранных критериев.

В соответствии с ГОСТ 27751–2014 сооружения (в том числе рассматриваемые подземные резервуары) в течение срока эксплуатации должны удовлетворять требованиям трех групп предельных состояний:

1. Первая группа предельных состояний — по несущей способности. При превышении критериального значения данного предельного состояния эксплуатация подземного резервуара невозможна, возникает аварийное состояние объекта, которое требует немедленного устранения.

2. Вторая группа предельных состояний — по эксплуатационной пригодности. При превышении критериального значения данного предельного состояния эксплуатация подземного резервуара возможна, но присутствует конвергенция, локальные осыпания.

3. Особые предельные состояния — состояния, возникающие при особых воздействиях.

В тоже время, в действующей методике приведено собственное классификационное подразделение подземных резервуаров по результатам прогноза устойчивости [7]. Каждому подземному резервуару присваивают одну из трех категорий устойчивости:

- *I и II категории* соответствуют второй группе предельных состояний
- *III категория* (аварийное состояние резервуара) соответствует первой группе предельных состояний.

Таким образом, оценка состояния объекта в действующей методике основывается на ГОСТ 27751–2014.

На основе прогноза устойчивости принимают решения о коррекции формы резервуара на проектной стадии, а также о возможности и методе его эксплуатации на эксплуатационной стадии. Таким образом, если резервуар отнесен к I, II категории, то возможно его строительство и эксплуатация. Если резервуар отнесен к III категории устойчивости, то необходима коррекция его конфигурации на проектной стадии, либо скорейшая ликвидация на эксплуатационной стадии.

Подразделение резервуаров по категориям производят по трем оценочным критериям: размер области чрезмерных деформаций в кровле выработки, размер области растягивающих нормальных напряжений на контуре выработки и значение оседания земной поверхности в районе устья скважины (табл.1).

Примечание: параметр n — расстояние от кровли подземного резервуара до вышележащего геологического слоя. Параметр Ω является обобщающим для геометрических размеров подземного резервуара: $\Omega = 0,04 \cdot H / R \cdot h$, где H — высота выработки, м; R — максимальный полупролет выработки

Таблица 1

Категория устойчивости подземного резервуара по оценочным критериям
Category of the underground reservoir stability according to the assessment criteria

Категория устойчивости	Оценочные критерии		
	Максимальное оседание поверхности, η_{\max} , м	Размер области чрезмерных деформаций $>$, м	Размер области растягивающих напряжений, м
I – устойчивый	$\eta_{\max} < 0,025h$	= 0	= 0
II – условно устойчивый	$0,025h \leq \eta_{\max} \leq 0,05h$	$< n$ $< \Omega$	$< n$ $< \Omega$
III – неустойчивый	$0,05h < \eta_{\max}$	$\geq n$ $\geq \Omega$	$\geq n$ $\geq \Omega$

(радиус), м; h – глубина заложения выработки, м.

Категорий устойчивости подземного резервуара определяют по максимальному полученному критерию. Ниже приведен анализ и подробное описание каждого из вышеупомянутых оценочных критериев.

- *Критерий № 1: размер области чрезмерных деформаций в кровле выработки*

По результатам численного расчета НДС оценивают размер зоны чрезмерных деформаций грунта (при наличии) и сравнивают с предельным значением Ω (табл. 1). В данном случае чрезмерная деформация – это упругая, пластическая деформация и деформация ползучести, превосходящая 20 %. К сожалению, точная оценка величины пластической составляющей деформации численными методами не может быть выполнена, поэтому использование данного критерия представляется не вполне оправданным.

- *Критерий № 2: размер области растягивающих нормальных напряжений на контуре выработки*

По результатам численного расчета из полученного распределения напряжений в грунте выделяют только зону растягивающих нормальных напряжений, по размеру которой резервуару присваивают одну из категорий устойчивости (табл.1).

Однако оценка размера зоны нормальных напряжений грунта без учета их величины не дает представления о возможности разрушения подземного резервуара [8]. Для того, чтобы определить, достигается ли первое предельное состояние (аварийное состояние резервуара), необходима оценка касательных напряжений в грунте [9]. Это справедливо, так как причиной потери несущей способности грунта является сдвиг, который вызывается касательными напряжениями [10]. Отсутствие в критерии анализа величины пластических зон не позволит в полной мере оценить возможность разрушения подземных резервуаров в многолетнемерзлых грунтах (рис. 2).

Поэтому фактически по действующей методике резервуары можно оценить только по второй группе предельных состояний.

- *Критерий № 3: значение оседания земной поверхности в районе устья скважины*

Расчетное прогнозируемое оседание земной поверхности сравнивают с допустимыми величинами. Значения максимально допустимых оседаний поверхности получены опытным путем на основе множественных данных результатов мониторинга (табл. 1).

При расчете оседания земной поверхности применяют численный

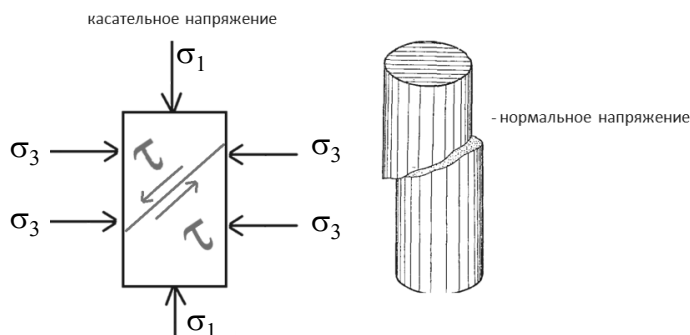


Рис. 2. Образование поверхности скольжения под действием касательных напряжений: σ_1 , σ_3 — соответственно, максимальное и минимальное главные напряжения, τ — касательное напряжение на опасной площадке

Fig. 2. Formation of a sliding surface under the action of shear stresses: σ_1 , σ_3 — respectively, the maximum and minimum principal stresses, τ — shear stress at the failure surface

Таблица 2

Значение граничных углов

The value of the boundary angles

Коэффициент крепости пород, f		Значение угла δ^0 , град
Среднее значение	Предел изменения	
0,1	до 0,3	40
...
1,5	1,3 – 2,0	55

и аналитический методы, регламентируемые действующей нормативно-технической документацией. По результатам расчета НДС определяют значение прогиба кровли резервуара. Далее полученное значение подставляют в формулу и получают максимальное оседание земной поверхности:

$$\eta_{\max} = q_0 m \sqrt{n_1 n_2},$$

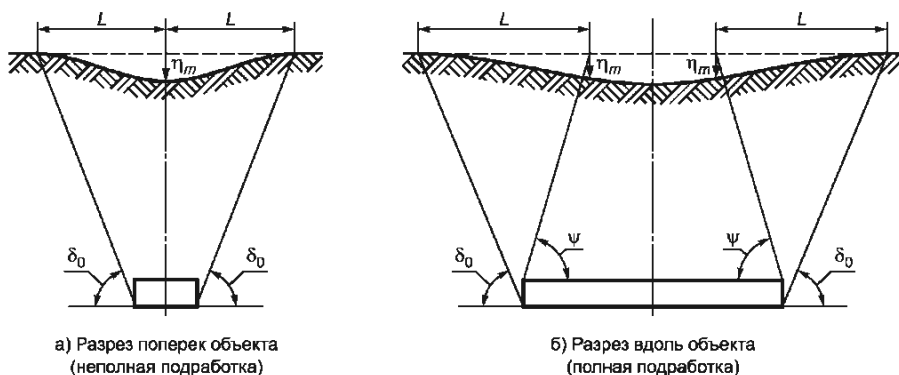
где m — значение прогиба кровли выработки-емкости; q_0 — коэффициент, учитывающий характер затухания сдвижений от выработки к земной поверхности, принимается равным максимальному — 0,9; n_1 и n_2 — коэффициенты подработанности, рассчитываемые исходя из геометрических характеристик выработки.

Данная формула приведена в ГОСТ 31937 — 2011 «Здания и сооружения.

Правила обследования и мониторинга технического состояния».

При долгосрочном прогнозе оседания земной поверхности необходимо учитывать не только значение оседания в тот или иной момент времени, но и временное развитие процесса его затухания.

Негативные геомеханические процессы, развивающиеся в приконтурных областях подземного резервуара, зачастую не имеют поверхностных проявлений. Наблюдения показывают, что часто при развитии вывалов в приконтурных областях резервуара оседание земной поверхности незначительно. В случае отклонения построенной формы резервуара от проектной, с течением времени происходит ее изменение. При достижении предельного значения прочности песчаных пород стенок резервуара они подвергаются вывалу,



ψ – угол полных движений 60°

Рис. 3. Схема сдвижения земной поверхности над выработкой: L – размер полумульды сдвижения горных пород η_m – максимальное оседание земной поверхности; δ_0 – граничный угол выработки

Fig. 3. The scheme of the earth's surface displacement over the mine: L – the size of the semi-trough of soils; η_m – subsidence of the earth's surface; δ_0 – the boundary angle of mine

формируя тем самым устойчивый свод естественности. При этом возмущение может не достигать земной поверхности, так как разгрузка напряжений происходит путем нарушения сплошности вмещающих пород. Поэтому прогнозировать состояние подземного резервуара предлагается по перемещению его кровли с использованием численных методов.

Как говорилось выше, исходя из проведенного прогноза, определяют сценарий дальнейшей эксплуатации каждого резервуара. Указанные ниже методы эксплуатации приведены в научно-исследовательских работах ООО «Газпром геотехнологии», но не встречаются ни в одном из действующих нормативных документов.

Если резервуар отнесен к I категории устойчивости, то возможно его нахождение в незаполненном состоянии до одного года. При присвоении II категории устойчивости резервуар необходимо заполнить водой. Предполагается, что до момента ввода в эксплуатацию стенки подземного резервуара будут находиться под давлением от веса воды, тем самым будет поддер-

живаться его устойчивость. Если подземный резервуар отнесен к III категории устойчивости, то необходима закачка продуктов высокой плотности сразу после окончания строительства. Запрещается нахождение резервуара в пустом состоянии, необходима его скорейшая ликвидация.

Неучтенные факторы при прогнозе устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах

1. В дополнение к вышеописанным параметрам рассчитывают мульду сдвижения горных пород. Вычисление данного параметра проводят для определения зоны влияния от сооружения каждого конкретного резервуара. Внешние границы мульды сдвижения рассчитывают согласно ГОСТ 31937 – 2011. В существующей практике расчет мульды сдвижения горных пород ведется только геометрическим методом: ее внешние границы принимают по граничным углам, исходя из коэффициента крепости пород по М. М. Протодьяконову (рис. 3). Для много-

летнемерзлых пород он равен 2 [11], соответственно граничный угол δ_0 принимают равным 55 градусам.

Такой способ не позволяет оценить динамику развития процесса и учесть геологическое строение массива пород, вмещающих подземный резервуар. Фактически расчет границ мульды сдвижения горных пород ведут исходя из табличного значения коэффициента крепости мерзлых пород и глубины заложения подземного резервуара. Использование вышеописанного метода снижает точность прогноза мульды сдвижения, поэтому требуется применение численных методов расчета границ влияния строительства подземных резервуаров.

2. В действующей методике прогноз состояния подземных резервуаров можно произвести только по второй группе предельных состояний. Методика не позволяет спрогнозировать аварийное состояние подземного резервуара, так как в критериях отсутствует оценка величины пластических зон. Ее определение возможно путем выделения точек пластического течения в грунте вокруг контура подземного резервуара с использованием численных методов.

3. В действующей методике при прогнозе устойчивости не учитывают возможные потери полезного объема подземного резервуара с течением времени. Изменение объема происходит вследствие двух процессов.

Во-первых, происходит заплывание стенок выработки в результате проявления реологических свойств мерзлых грунтов. С течением времени в них развиваются деформации, которые приводят к изменению формы резервуара — конвергенции.

Во-вторых, при превышении предела прочности мерзлых грунтов возникают локальные вывалы из стенок и кровли

подземного резервуара. В данном случае под “локальными” имеются в виду вывалы/разрушения, которые носят ограниченный характер и не вызывают полное разрушение выработки с выходом на поверхность. Под их действием образуется устойчивый свод в районе внутренней обсадной колонны. По технологическим причинам объем свода над обсадной колонной недоступен для размещения продуктов хранения, а в результате вывалов поднимается дно подземного резервуара. Для оценки объема вывалов численными методами необходимо проанализировать область точек, в которых наблюдается пластическое течение.

Таким образом, для прогноза снижения полезного объема подземного резервуара необходимо учитывать вышеописанные геомеханические процессы. Оценка их интенсивности, а также их численное выражение возможны с применением численных методов.

4. Описанные выше методы эксплуатации резервуара, исходя из определенной категории устойчивости, помогают выбрать дальнейшую схему эксплуатации. Однако они не позволяют сравнить устойчивость резервуаров между собой и, исходя из этого, принять управляющие решения по этапности их заполнения. Для сохранения полезного объема подземных резервуаров необходимо разработать такую схему.

Предложения по корректировке методики оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах

Оценочные критерии устойчивости подземных резервуаров

в многолетнемерзлых породах

Согласно ГОСТ 27751—2014 оценка надежности строительных объектов должна вестись по трем группам предельных состояний (см. выше). В связи

с этим предлагается доработать действующую методику оценки устойчивости подземных резервуаров.

1. Первая группа предельных состояний, а именно общая потеря устойчивости в кровле резервуара, будет фиксироваться по критерию развития пластических зон. В данном случае под общей потерей устойчивости имеется в виду полное разрушение подземного резервуара с выходом на поверхность. С помощью методов численного моделирования будет определен размер зоны разрушения по точкам, в которых наблюдается пластическое течение породы.

2. Вторая группа предельных состояний будет фиксироваться по двум оценочным критериям.

- Первый критерий второй группы предельных состояний — перемещение кровли подземного резервуара. Разработка граничных значений данного критерия будет произведена на основании действующих нормативных документов.

- Второй критерий второй группы предельных состояний — уменьшение полезного объема подземного резервуара с течением времени. В данном критерии будет учитываться потеря объема резервуара в результате действия двух процессов: (1) деформаций мерзлых грунтов с течением времени и (2) локальных вывалов из кровли выработки. Потеря объема резервуара в результате (1) первого процесса определяется величиной заплывания выработки — конвергенцией в резуль-

тате проявления реологических свойств мерзлого грунта. Потеря объема резервуара в результате (2) второго процесса определяется объемом вывалов грунта из кровли выработки. Таким образом, общее уменьшение полезного объема выработки складывается из потери ее объема в результате действия первого и второго процессов. Граничные значения данного критерия будут установлены с учётом экономически возможных потерь полезного объема подземных резервуаров (табл. 3).

Категории устойчивости и методы эксплуатации подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах

На основании скорректированных критериев предлагается проведение прогноза устойчивости подземных резервуаров в два этапа.

На первом этапе необходимо оценить возможность разрушения подземного резервуара с образованием провала на земной поверхности. В данном случае следует говорить об аварийном состоянии подземного резервуара. Такое развитие событий возможно в результате серьезного нарушения установленного регламента на строительство. Однако согласно ГОСТ 27751 — 2014 для всех подземных резервуаров должен быть произведен расчет по несущей способности. В связи с этим, на первом этапе предлагается подразделять подземные резервуары на две категории:

Таблица 3

Оценочные критерии устойчивости подземного резервуара
Criteria for the condition of an underground reservoir

Группы предельных состояний	Оценочные критерии устойчивости
Первая группа	Размер пластических зон
Вторая группа	Перемещение кровли подземного резервуара
	Уменьшение полезного объема подземного резервуара с течением времени

- **I** категория резервуара — неаварийный;
- **II** категория резервуара — аварийный.

На первом этапе будет использована формулировка критерия первой группы предельных состояний (см. выше). При прогнозе разрушения построенного подземного резервуара необходима закачка твердых продуктов с одновременным удалением воды через основную или дополнительную скважину, либо скорейшая ликвидация — решение №3 (табл. 5). При этом запрещается нахождение резервуара в пустом состоянии. Если по результатам оценки выработки на стадии проекта получена II категория, то необходимо скорректировать форму резервуара путем изменения его конфигурации/объема.

Если на основании первого этапа подземный резервуар признается неаварийным, то далее необходимо оценить возможность его нормальной эксплуатации на втором этапе. Целесообразность этого объясняется тем, что с течением времени даже неаварийный резервуар снижает свою эксплуатационную пригодность. В основном ее снижение происходит в результате уменьшения полезного объема резервуара и перемещения его кровли. Для того, чтобы сократить ухудшение эксплуатационных качеств резервуара, следует в зависимости от его состояния принимать соответствующие превентивные меры.

В связи с этим, на втором этапе предлагается I категорию подземных резервуара подразделять на подкатегории:

- **Ia** подкатегория резервуара — пригодный к эксплуатации;
- **Ib** подкатегория резервуара — условно пригодный к эксплуатации.

Отнесение резервуара к одной из данных подкатегорий будет произведено по перемещению кровли и по сум-

марному уменьшению полезного объема резервуара за счет ползучести и локальных вывалов породы из его кровли. При Ia подкатегории резервуар можно нормально эксплуатировать. В данном случае емкость можно заполнять продуктами любой плотности, возможно длительное его нахождение в пустом состоянии — решение № 1. На стадии проекта именно эта категория должна быть получена для всех планируемых для строительства форм подземных резервуаров.

Если резервуар отнесен к Ib подкатегории, то для нормальной его эксплуатации необходимо дополнительное противодавление на его стенки, например, путем увеличения плотности загружаемых продуктов, а также минимизация времени пустого простоя — решение № 2. Если данная категория получена для формы резервуара на стадии проекта, то необходимо ее скорректировать.

Алгоритм выделения категории устойчивости резервуара с номером управляющего решения представлен на рисунке 4. На схеме также указаны оценочные критерии, используемые на первом и втором этапах для выделения категории/подкатегории устойчивости резервуара (рис. 4). В таблице 4 приведены управляющие решения для минимизации негативных геомеханических процессов в связи со строительством и эксплуатацией подземных резервуаров. Решения представлены для построенных подземных резервуаров в соответствии с полученной категорией/подкатегорией устойчивости (табл. 4).

Последовательность заполнения готовых подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах

Ввод в эксплуатацию готовых подземных резервуаров осуществляют поочередно. В настоящий момент уста-

Таблица 4

Управляющие решения для минимизации негативных геомеханических явлений в результате строительства и эксплуатации подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах
Control solutions for minimization of negative geomechanical phenomena as a result of construction and operation of underground reservoirs in permafrost

Категория/ подкатегория устойчивости резервуара	Управляющее решение
Ia	Решение № 1: Возможно заполнение продуктами любой плотности и простой в незаполненном состоянии.
Ib	Решение № 2: Необходимо дополнительное противодействие на его стенки, например, путем заполнения продуктами повышенной плотности, минимизация времени ожидания заполнения.
II	Решение №3: Заполнение твердыми продуктами с одновременным удалением воды через основную или дополнительную скважину, запрещается нахождение резервуара в незаполненном состоянии.

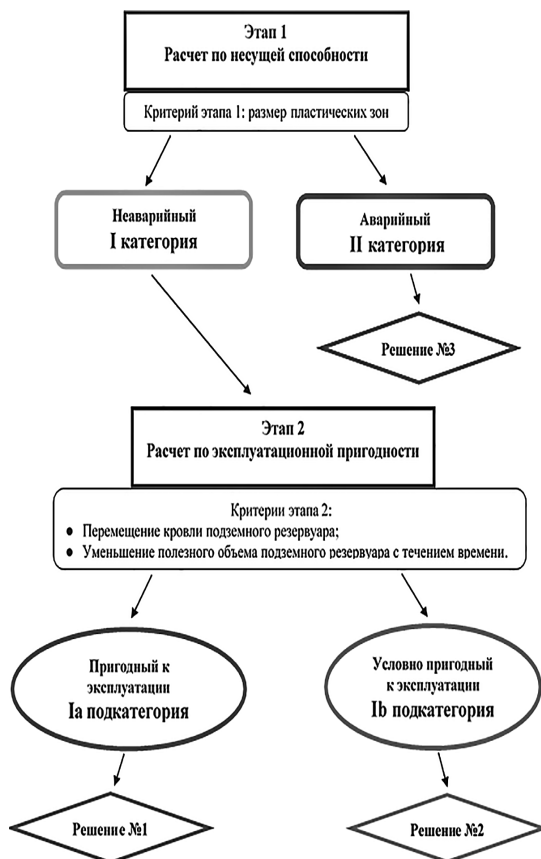


Рис. 4. Алгоритм выделения категории устойчивости подземного резервуара в многолетнемерзлых породах

Fig. 4. Algorithm for identifying the category of an underground reservoir in permafrost state

новление последовательности их заполнения не прописано в методике. Предлагается разработать схему поэтапного заполнения подземных резервуаров на основе прогнозируемого уменьшения их объема. В данном случае будет учитываться потеря полезного объема резервуара за счет локальных вывалов из его кровли и конвергенция емкости ввиду ползучести мерзлых грунтов. Расчеты по первому и второму предельным состояниям позволят установить их суммарное значение. Таким образом, резервуары, у которых прогнозируется большая потеря полезного объема, будут заполнены первыми, что, в свою очередь, положительно скажется на эффективности процесса эксплуатации.

Заключение

В действующей методике оценки устойчивости не учитывают области разрушений приконтурных пород массива по величине пластических зон. Прогноз эксплуатационной пригодности подземного резервуара ведут без учета потери его полезного объ-

ема. Выявлено, что основными процессами ответственными за снижение объема резервуара являются: конвергенция стенок выработки в результате ползучести грунтов и локальные вывалы из ее кровли. В связи с этим прогноз эксплуатационной пригодности подземного резервуара рекомендуется проводить по двум критериям: (1) перемещение кровли подземного резервуара, (2) уменьшение полезного объема подземного резервуара с течением времени.

Помимо этого, в действующей методике отсутствует информация о последовательности загрузки продуктов в готовые подземные резервуары. В связи с этим предложено ввести схему последовательности заполнения емкостей на основе прогнозируемого уменьшения их полезного объема.

Исходя из проведенных исследований можно сделать вывод, что разработка выдвинутых предложений позволит точно прогнозировать состояние подземных резервуаров, повысит надежность и безопасность их использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казарян В. А., Сильвестров Л. К., Теплов М. К., Хрулев А. С., Погодаев А. В., Юсупов Д. А. Опыт эксплуатации подземного хранилища газового конденсата, созданного в многолетнемерзлых породах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2011. — № 6. — С. 247–258.
2. Аксютин О. Е., Казарян В. А., Ишков А. Г. и др. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. — И: Ижевский институт компьютерных исследований, 2013. — 430 с.
3. Мосина А. С., Николаева С. К., Скворцов А. А. Прогноз изменения состояния многолетнемерзлой грунтовой толщи под влиянием строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения в условиях Крайнего Севера (на примере среднего Ямала) // Инженерная геология. — 2020. — Том 15, № 2. — С. 68–81. DOI 10.25296/1993–5056–2020–15–2-68–81.
4. Sun J., Wang J., Zheng D., Xu H., Li C., Zhao K., Pan Y. Regional Scale 3D Geomechanical Modeling For Evaluating Caprock Integrity And Fault Leakage Potential During Underground Gas Storage Operations In A Produced Field // Society of Petroleum Engineers (SPE), USA, 2017. DOI 10.2118/186053-MS .
5. Пискунова А. С., Сурин С. Д., Воронова А. В. Проблемы захоронения буровых отходов в подземных резервуарах скважинного типа в многолетнемерзлых грунтах //

Сергеевские чтения: Вып. 20: Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.) – М., 2018. – С. 244–250.

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. DOI 10.1016/j.coldregions.2016.10.010

7. Воронова А. В., Скворцов А. А. Оценка устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 9. – С. 35–46. DOI 10.25018/0236-1493-2018-9-0-35-46.

8. Филоненко-Бородич М. М. Механические теории прочности. – М.: Изд-во Московского университета, 1961. – 90 с.

9. Dov Leshchinsky, Ben Leshchinsky, Ora Leshchinsky. Limit state design framework for geosynthetic-reinforced soil structures // *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, Vol. 45, no 6, pp. 642–652 DOI 10.1016/j.geotextmem.2017.08.005.

10. Zhifu Shen, Mingjing Jiang & Colin Thornton. Shear strength of unsaturated granular soils: three-dimensional discrete element analyses // *Granular Matter*, 2016, Vol. 18, article number: 37 (2016). DOI: 10.1007/s10035-016-0645-x.

11. Мельников Н. В., Ржевский В. В., Протодьяконов М. М. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

12. 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 <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.02.008>. **VIAB**

REFERENCES

1. Kazaryan V. A., Silvestrov L. K., Teplov M. K., Hrulev A. S., Pogodaev A. V., Yusupov D. A. The operational experiment of the underground storage of the condensate, created at the everfrost rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 6, pp. 247–258. [In Russ]

2. Aksyutin O. E., Kazaryan V. A., Ishkov A. G. and others. *Stroitel'stvo i ekspluatatsiya rezervuarov v mnogoletnemerzlykh osadochnykh porodakh* [Construction and operation of reservoirs in permafrost sedimentary soils], Izhevsk, Izhevskii institut komp'yuternykh issledovaniy, 2013, 430 p. [In Russ]

3. Mosina A. S., Nikolaeva S. K., Skvortsov A. A. Forecast of changes in the condition of the permafrost soil mass under the influence of the construction and operation of underground reservoirs for disposal of waste drilling in the conditions of the Far north (on the example of the Middle Yamal). *Engineering geology world*. 2020, no. 2/2020, Vol. XV, pp. 68–81. DOI 10.25296/1993–5056–2020–15–2-68–81. [In Russ]

4. Sun J., Wang J., Zheng D., Xu H., Li C., Zhao K., Pan Y. Regional Scale 3D Geomechanical Modeling For Evaluating Caprock Integrity And Fault Leakage Potential During Underground Gas Storage Operations In A Produced Field. Society of Petroleum Engineers (SPE), USA, 2017. DOI 10.2118/186053-MS.

5. Piskunova A. S., Surin S. D., Voronova A. V. *Problemy zakhoroneniya burovnykh otkhodov v podzemnykh rezervuarakh skvazhinnogo tipa v mnogoletnemerzlykh gruntakh* [Problems of disposal of waste drilling in borehole underground reservoirs in permafrost soils]. Sergeevskie chteniya: Vyp. 20: Obrashchenie s otkhodami: zadachi geoekologii i inzhenernoi geologii. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii (22 marta 2018 g.). 2018, pp. 244–250 [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. DOI 10.1016/j.coldregions.2016.10.010

7. Voronova A. V., Skvortsov A. A. Stability of underground storage reservoirs in permafrost rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 9, pp. 35–46. DOI 10.25018/0236–1493–2018–9-0–35–46. [In Russ]

8. Filonenko-Borodich M. M. *Mekhanicheskie teorii prochnosti* [Mechanical strength theories], Moscow, Moskovskii universitet Publ., 1961, 90 p. [In Russ]

9. Dov Leshchinsky, Ben Leshchinsky, Ora Leshchinsky. Limit state design framework for geosynthetic-reinforced soil structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, Vol. 45, no. 6, pp. 642–652 DOI 10.1016/j.geotexmem.2017.08.005.

10. Zhifu Shen, Mingjing Jiang & Colin Thornton. Shear strength of unsaturated granular soils: three-dimensional discrete element analyses. *Granular Matter*, 2016, Vol. 18, article number: 37 (2016). DOI: 10.1007/s10035–016–0645-x.

11. Mel'nikov N. V., Rzhhevskii V. V., Protod'yakonov M. M. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornyykh porod* [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks], Moscow, Nedra, 1975, 279 p. [In Russ]

12. 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 <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.02.008>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Мосина Анна Сергеевна*¹ – аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета, mosina.a.s@yandex.ru;

*Мирный Анатолий Юрьевич*¹ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник геологического факультета, MirnyuAY@mail.ru;

*Скворцов Алексей Александрович*² – канд. техн. наук, начальник отдела геомеханического и гидрогазодинамического моделирования;

*Сури́н Степа́н Дми́триевич*² – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник;

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия;

² ООО «Газпром геотехнологии», Москва, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Mosina A. S.*¹, postgraduate student of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology;

*Mirnyy A. Y.*¹, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, Faculty of Geology;

*Skvortsov A. A.*², Cand. Sci. (Eng.), head of the Department of Geomechanical and Hydrodynamic Modeling;

*Surin S. D.*², Cand. Sci. (Eng.), leading research worker;

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Gazprom Geotechnology LLC, Moscow, Russia.

Получена редакцией 16.11.2020; получена после рецензии 03.02.2021; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 16.11.2020; received after the review 03.02.2021; accepted for printing 10.02.2021.

