

УДК 622.245.1

Методика расчета на устойчивость эксплуатационной колонны из полимерного материала в многолетнемерзлых породах

В.А.СТЕТЮХА¹, И.И.ЖЕЛЕЗНЯК²

¹ *Забайкальский государственный университет, Чита, Россия*

² *Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия*

Целью работы является разработка методики расчета на устойчивость эксплуатационной колонны кольцевого сечения (трубы) из полимерного материала при освоении месторождений полезных ископаемых методом подземного выщелачивания в многолетнемерзлых породах. Результат достижения поставленной цели ориентирован на определение геометрических параметров трубы, обеспечивающих ее эксплуатационную надежность.

Актуальность исследования связана с особенностями внешних воздействий на колонну, например геотехнологической скважины, работающую в массиве многолетнемерзлых пород в условиях дополнительного воздействия от давления льда при замерзании воды в заколонном пространстве. Такое воздействие сопровождается, как правило, деформацией трубы при обжатии ее льдом, что может приводить к смятию трубы, к нарушению технологического процесса и риску загрязнения геологической среды.

Предлагаемая методика расчета колонны из полимерного материала заключается в моделировании объектов с применением метода конечных элементов. При этом используются пространственные конечные элементы, с помощью которых моделируются основные взаимодействующие друг с другом элементы геотехнологического природно-техногенного комплекса: труба из полимерного материала, лед в заколонном пространстве и примыкающие к скважине однородные или неоднородные массивы горных пород.

Результаты исследования представлены в виде таблиц и мозаик перемещений, в которых отражены напряжения и деформации в элементах расчетной схемы. Анализ полученных результатов подтверждает возможность эксплуатации трубы из полимерных материалов различного технологического назначения в разнообразных условиях криолитозоны, в том числе экстремальных. Выполнена оценка результатов перераспределения давления, создаваемого льдом при замерзании воды в заколонном пространстве, на массив горных пород и колонну. Определены взаимосвязанные деформации массива пород и эксплуатационной колонны при замерзании воды в заколонном пространстве. Установлена необходимость учета свойств массива горных пород при определении давления на колонну. Выявлены условия смятия трубы при различном сочетании ее параметров.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы; скважина; эксплуатационная колонна; устойчивость; обжатие льдом; обратное промерзание; давление смятия

Как цитировать эту статью: Стетюха В.А. Методика расчета на устойчивость эксплуатационной колонны из полимерного материала в многолетнемерзлых породах / В.А.Стетюха, И.И.Железняк // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 22-28. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.22

Введение. В зоне распространения многолетнемерзлых пород на территории России и за рубежом расположено большое количество разрабатываемых и перспективных месторождений полезных ископаемых [7, 17, 20]. Условия их разработки [12, 13] требуют учета взаимодействия многолетнемерзлых пород и эксплуатируемых скважин. В конструкциях технологических скважин широко используются эксплуатационные колонны из полимерных материалов. Улучшение качества таких материалов в последние годы позволило их применять в условиях криолитозоны [4, 14]. При консервации или длительной остановке эксплуатационных скважин в условиях распространения многолетнемерзлых пород возможно замерзание воды в заколонном пространстве и смятие колонн. Для оценки надежности труб из полимерных материалов должна выполняться их проверка на способность выдерживать приложенную к ним нагрузку с учетом всех условий и особенностей работы, включая давление льда при замерзании воды в заколонном пространстве.

Результаты исследований целого ряда авторов по определению дополнительного силового воздействия на колонну от давления льда при замерзании воды в заколонном пространстве (так называемого обратного промерзания) дают широкий диапазон показателей. Они указывают на то, что на величину давления на трубу при обратном промерзании существенно влияют перепад температуры, величина зазора между трубой и массивом горных пород, состав мерзлых пород. В герметичной полости при замерзании воды максимальное давление в зависимости от перепада температуры достаточно корректно может определяться по формуле Бриджмэна – Таммана.



С использованием этой формулы установлено [9], что при снижении температуры на $7,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление на трубу в герметичной полости повышается на 84 МПа.

Очевидно, что при замерзании воды в заколонном пространстве давление льда вызывает деформации, как в трубе, так и в массиве горных пород. Так, по расчетам Р.И.Медведского расчетное давление при обратном промерзании воды при стенках скважины, сложенных песчаными породами, составило 17,3 МПа [9]. Здесь же приводятся расчеты давления на трубы на месторождении Прудо (Аляска, США) в скважине, где отмечается чередование песков и глин. В зависимости от мощности прослоек глины расчеты Р.И. Медведского дают значения давления внутри полости 8,5-11,4 МПа. Автор сравнивает полученные им результаты с данными промысловых экспериментов. На Мессояхском месторождении для мерзлых песков было зафиксировано давление 20,6 МПа, на месторождении Прудо при чередовании песков и глин давление составило 13 МПа. Более низкое давление на месторождении Прудо объясняется наличием глинистых включений.

В.Г.Кузнецов [5] приводит результаты измерения давления в заколонном пространстве в скважине на Харасавэйском месторождении. При температуре $t = -1,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление $p = 14,62\text{ МПа}$, через три месяца при $t = -4,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление $p = 39,53\text{ МПа}$. Он также приводит данные промысловых исследований на месторождении Прадхо-Бей, где максимальное давление при обратном промерзании составило 14,6 МПа.

В статье Г.В.Зверева и А.Ю.Тарасова [3] с использованием эмпирической формулы Бриджмэна – Таммана, в которой давление зависит только от перепада температуры, вычисляется максимально возможное давление при разных температурах охлаждающейся воды в межтрубном пространстве. При температуре $t = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление $p = 12,6\text{ МПа}$, при температуре $t = -1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление $p = 18,8\text{ МПа}$, при температуре $t = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление $p = 24,9\text{ МПа}$.

Постановка проблемы. Как видно из представленных материалов, диапазон величин давления льда на трубу довольно широк. Как правило, эмпирические формулы, используемые для определения давления льда на трубу при обратном промерзании, содержат ограниченное число параметров. Уточнение величины давления обратного промерзания является актуальной задачей. Для получения достоверных результатов при решении указанной проблемы потребовалась разработка новых методик [2, 3, 5, 6, 10, 11]. Используемая модель должна соответствовать реальным условиям взаимодействия и взаимного влияния ее составных элементов друг на друга. Значительная деформативность труб из полимерных материалов требует такой методики расчета, которая бы учитывала деформационные характеристики всех элементов расчетной схемы в условиях высокого давления, возникающего при обратном промерзании. Смятие эксплуатационной колонны может привести к крупным авариям и их тяжелым последствиям [18]. Наиболее объективную картину напряженно-деформированного состояния трубы и примыкающего к ней массива пород дает применение метода конечных элементов [16] и решение пространственной задачи термоупругости. При таком подходе в качестве исходной информации используются механические характеристики и размеры трубы, параметры льда в кольцевом зазоре в заколонном пространстве и характеристики примыкающего массива горных пород.

Цель настоящей работы – разработка методики расчета на устойчивость эксплуатационной колонны из полимерного материала в многолетнемерзлых породах с учетом наибольшего числа параметров с использованием метода конечных элементов.

Методология. Предлагаемая методика сводится к моделированию воздействия обратного промерзания воды в затрубном пространстве на эксплуатационную колонну и массив мерзлых горных пород на основе метода конечных элементов. На рис.1 представлен фрагмент расчетной модели массива горных пород, примыкающих к трубе, часть трубы и льда в кольцевом зазоре в заколонном пространстве, ограниченные по высоте в пределах 1 м, как конечно-элементная модель исследуемого объекта. Труба из непластифицированного поливинилхлорида (НПВХ), массив льда в затрубном пространстве и примыкающие породы моделируются объемными конечными элементами. Для численного моделирования используется программный комплекс ЛИРА САПР. Для элементов модели задаются физические и механические свойства. Предлагаемая методика позволяет формировать неоднородные массивы горных пород присвоением различных свойств отдельным конечным элементам. Необходимая густота сетки конечных элементов, обес-

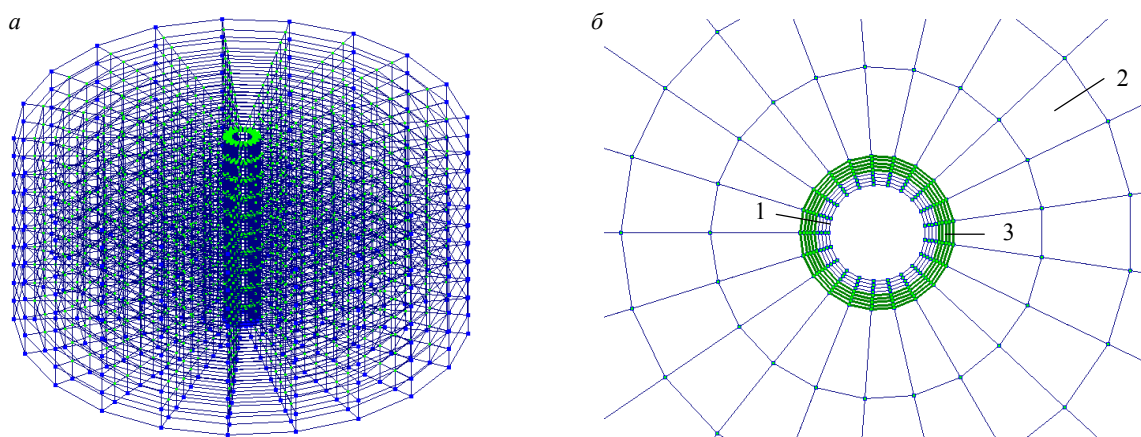


Рис. 1. Расчетная схема: а – фрагмент трубы в массиве породы; б – поперечное сечение

1 – труба из НПВХ; 2 – массив горной породы; 3 – лед

печивающая точность вычислений, определяется результатами предварительных численных экспериментов. Перемещения массива пород в радиальном направлении ограничиваются установкой связей в узлах на его наружном контуре.

Для оценки напряжений и деформаций в рассматриваемой системе задаются необходимые величины объемных деформаций, имитирующие процесс фазового перехода воды в лед в колонном пространстве. Рассматривается вариант равномерного замерзания воды (симметричная задача). Задается снижение температуры до $-1,5-2$ °С, что обеспечивает замерзание воды в колонном пространстве. С использованием итерационного процесса определяется давление на элементы расчетной модели, вызываемое увеличением объема при переходе воды в лед. Получаемое давление на трубу сравнивается с критическим давлением, определяемым по формуле [19]

$$P_{кр} = \frac{Eh^3}{4(1-\nu^2)R^3}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; h – толщина стенки трубы; R – средний радиус трубы; ν – коэффициент Пуассона.

В результате вычислений определяются перемещения всех узлов сетки конечных элементов и внутренние усилия в элементах модели, включая радиальные и кольцевые напряжения в трубе, что позволяет оценивать характер распределения давления на отдельные элементы расчетной схемы и способность воспринимать приложенную к ним нагрузку.

Обсуждение. Результаты расчета труб с различными характеристиками и примыкающих массивов пород представлены в табл. 1, 2. В ходе вычислений варьировались толщина стенки и диаметр трубы, размер ледяной прослойки, свойства массива горной породы. В строке 1 табл. 1 приводятся результаты расчета трубы с размерами и свойствами, указанными в нормативных документах ГОСТ Р 51613 (ГОСТ Р 51613-2000. Трубы напорные из непластифицированного поливинилхлорида. Технические условия), СП-40-102-2000 (СП-40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования). При этом варианте рассматривается труба с наружным диаметром 140 мм, толщиной стенки 10,3 мм, модулем Юнга $E_{тр} = 3000$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu_{тр} = 0,36$, плотностью $\rho_{тр} = 1,4$ т/м³. Вмещающий массив породы – мерзлый песок – имеет плотность $\rho = 1,6$ т/м³ и механические характеристики: модуль Юнга $E = 3650$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ [8]. К расчету приняты следующие характеристики льда: $E_{льда} = 900$ МПа [15], коэффициент Пуассона $\nu_{льда} = 0,34$ [1]. Труба расположена в скважине диаметром 171,4 мм. Зазор между трубой и стенкой скважины составляет 15,7 мм. Как следует из приводимых в табл. 1 результатов, давление на рассматриваемую трубу при замерзании воды превышает критическое значение, что приводит к потере устойчивости и смятию трубы. Как видно из второй строки табл. 1, использование аналогичной трубы из материала с меньшим модулем Юнга приводит к снижению давле-



ния на трубу. Это объясняется увеличением деформаций трубы. В то же время уменьшение модуля Юнга приводит к снижению критического давления. Условие потери устойчивости эксплуатационной колонны при этом сохраняется.

Таблица 1

Результаты расчета трубы диаметром 140 и 160 мм

№ п/п	Характеристики вариантов, порода	Размер ледяной прослойки, мм	Толщина стенки трубы, мм	Давление на трубу, МПа	Критическое давление, МПа	Кольцевое усилие в трубе, МПа	Давление на породы, МПа
Диаметр 140 мм							
1	Труба по ГОСТу, песок, $E_{тр} = 2000$ МПа	15,7	10,3	7,15	2,30	15,4	6,26
2	Труба по ГОСТу, песок, $E_{тр} = 3000$ МПа	15,7	10,3	9,59	3,45	22,3	7,21
3	Труба с утолщенной стенкой, песок, $E_{тр} = 3000$ МПа	15,7	15	12,0	11,9	21,2	10,5
4	Труба с утолщенной стенкой, песок, $E_{тр} = 3000$ МПа	15,7	16	12,6	14,8	21,3	11,1
5	Труба с утолщенной стенкой, песок, $E_{тр} = 3000$ МПа	15,7	17	13,4	18,2	21,4	11,7
6	Труба с утолщенной стенкой, суглинок, $E_{тр} = 3000$ МПа	15,7	16	9,89	14,8	16,2	7,44
7	Труба с увеличенным зазором, песок, $E_{тр} = 3000$ МПа	28,5	16	20,9	14,8	34,9	15,7
Диаметр 160 мм							
8	Труба по ГОСТу, песок, $E_{тр} = 3000$ МПа	15,25	11,8	7,61	3,48	17,7	5,73
9	Труба с утолщенной стенкой, песок, $E_{тр} = 3000$ МПа	15,25	16	9,78	9,46	18,1	7,36
10	Труба с утолщенной стенкой, песок, $E_{тр} = 3000$ МПа	15,25	18	10,8	14,04	18,3	8,14

Так как наибольшее влияние на устойчивость трубы оказывает толщина ее стенки, были рассмотрены трубы с толщиной стенки, отличной от предусмотренной стандартом. Как следует из табл.1, увеличение толщины стенки трубы до 15 мм не обеспечивает устойчивость конструкции, поскольку давление льда на трубу превышает критическое. В последующих вариантах при расчете трубы с толщиной стенки 16 и 17 мм определяется степень влияния толщины стенки на величину критического давления льда. В обоих указанных вариантах давление на трубу не превышает критических значений.

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние системы «труба – массив породы» с увеличением зазора между трубой и стенкой скважины до 28,5 мм. Такой вариант получен при увеличении диаметра скважины до 197 мм и при размещении в ней трубы диаметром 140 мм с толщиной стенки 16 мм. С увеличением ледяной прослойки давление льда на трубу из полимерного материала резко возрастает и ее устойчивость не обеспечивается. Для определения влияния состава массива пород на напряженно-деформированное состояние трубы и пород в качестве вмещающего массива также рассматривается суглинок. В результате установлено, что при размещении скважины в массиве пород, состоящих из суглинков (строка 6 в табл.1), значительные деформации суглинков приводят к снижению давления льда на трубу из полимерного материала, которое при этом не превышает критическое. Это объясняется большими различиями между модулями упругости рассматриваемых пород.

Для оценки результатов были выполнены расчеты трубы увеличенного диаметра (табл.1). Как видно из таблицы, труба размером 160 × 11,8 мм, соответствующая ГОСТ Р 51613-2000, испытывает давление льда, превышающее критическое, и не может быть использована при обозначенных в таблице условиях (мерзлый песок, зазор 15,25 мм). На трубу с толщиной стенки

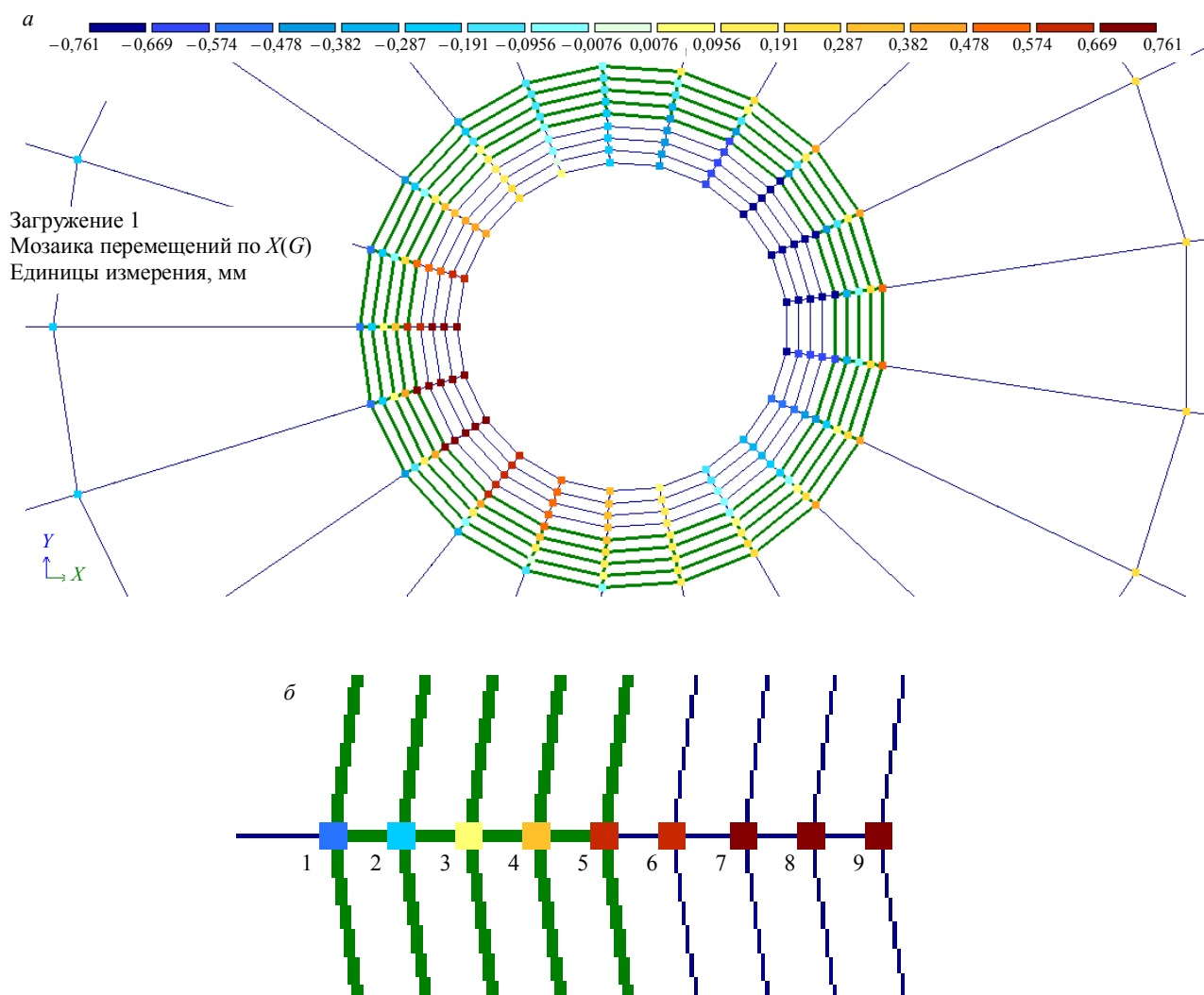


Рис.2. Мозаика перемещений узлов конечно-элементной модели: *a* – мозаика перемещений в произвольном сечении; *б* – фрагмент мозаики перемещений узлов трубы и льда
Перемещения: узла 1 – минус 0,57 мм; узла 2 – минус 0,29 мм; узла 3 – 0,19 мм; узла 4 – 0,38 мм; узлов 5-6 – 0,67 мм, узлов 7-9 – 0,766 мм

16 мм действует давление льда, незначительно превышающее критическое. Труба с толщиной стенки 18 мм обеспечивает безопасную работу эксплуатационной колонны в указанных выше условиях.

На рис.2 приводится мозаика перемещений узлов конечно-элементной модели, возникающих в результате замерзания воды в заколонном пространстве и последующего увеличения объема льда для варианта, представленного в строке 6 табл.1. Рядом с узлами указаны их номера, приводятся перемещения узлов относительно глобальной системы координат вдоль оси x . Перемещения узлов указаны относительно их первоначального положения до приложения нагрузки. Максимальные горизонтальные перемещения узлов относительно их первоначального положения до приложения нагрузки отмечаются в элементах трубы.

Из анализа представленных на рис.2 и в табл.2 результатов следует, что суммарная деформация прослойки льда с учетом его обжатия составляет для рассматриваемого варианта 1,24 мм. Перемещение наружной грани стенки трубы в результате ее обжатия льдом составляет 0,67 мм. Перемещение стенки скважины под давлением льда 0,57 мм. Таким образом, доля деформаций горной породы для рассматриваемого варианта составляет около половины от суммарных деформаций ледяной прослойки. Доля деформаций мерзлого песка в 2 раза меньше. В целом это указывает на необходимость учета деформаций стенки скважины при формировании расчетных моделей.



Таблица 2

Перемещения узлов расчетной модели

№ п/п	Характеристики вариантов, порода	Перемещение стенки скважины, мм	Перемещение поверхности трубы, мм	Деформация льда, мм	Увеличение размера слоя льда при замерзании воды, мм
1	Труба по ГОСТу, песок, $\delta = 10,3$ мм, зазор 15,7 мм	0,14	1,10	0,17	1,41
2	Труба с утолщенной стенкой, песок, $\delta = 15$ мм, зазор 15,7 мм	0,24	0,96	0,21	1,41
3	Труба с утолщенной стенкой, песок, $\delta = 16$ мм, зазор 15,7 мм	0,24	0,95	0,22	1,41
4	Труба с утолщенной стенкой, суглинок, $\delta = 16$ мм, зазор 15,7 мм	0,57	0,67	0,17	1,41
5	Труба с увеличенным зазором, песок, $\delta = 16$ мм, зазор 28,5 мм	0,39	0,58	0,59	2,56

Увеличение модуля Юнга любого из составных элементов системы «труба – массив породы» приводит к увеличению внутренних усилий и давления на эксплуатационную колонну и наоборот. Решение многофакторной задачи с применением объемных конечных элементов обеспечивает учет взаимозависимости деформаций и взаимного влияния элементов расчетной модели друг на друга. Напряжения в стенке трубы не превышают предела текучести материала (ГОСТ Р 51613-2000) и угрозой для эксплуатационной колонны является потеря устойчивости и смятие трубы из полимерного материала под давлением при обжатии льдом.

Заключение. Представленная методика определения напряженно-деформированного состояния эксплуатационных колонн из полимерного материала и примыкающих к ним массивов пород с использованием пространственных конечных элементов позволяет оценить способность колонн выдерживать приложенную к ним нагрузку от давления льда при замерзании воды в заколонном пространстве. Расчетами установлены необходимые геометрические параметры (толщина стенки и диаметр) трубы из полимерного материала, обеспечивающие ее устойчивость под действием радиальной нагрузки. Определена степень распределения деформаций льда между элементами расчетной схемы. Установлена необходимость включения массивов пород в расчетную схему, так как их деформации соизмеримы по величине с деформациями колонны. Представленная методика расчета трубы может быть применена и для других условий ее работы, отличных от приводимых в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бычковский Н.Н.* Ледовые строительные площадки, дороги и переправы / Н.Н.Бычковский, Ю.А.Гурьянов; Саратовский государственный технический университет. Саратов, 2005. 260 с.
2. *Железняк И.И.* Расчет трубы из полимерного материала на действие внешней нагрузки в скважине в массиве многолетнемерзлых пород / И.И.Железняк, В.А.Стетюха // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. Вып. 3 (51). С. 113-117. DOI 10.21440/2307-2091-2018-3-121-125
3. *Зверев Г.В.* Расчет и анализ воздействия многолетнемерзлых пород на крепление скважины № 338 Ванкорского месторождения во время эксплуатации / Г.В.Зверев, А.Ю.Тарасов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 8. С. 41-51.
4. *Иванов А.Г.* Выбор материала обсадных труб для оборудования эксплуатационных скважин подземного выщелачивания / А.Г.Иванов, И.Н.Солодов // Горный журнал. 2018. № 7. С. 81-85. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.16
5. *Кузнецов В.Г.* Техника и технология повышения долговечности крепи скважин в криолитозоне (Проблемы и решения): Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Тюменский государственный нефтегазовый университет. Тюмень, 2004. 50 с.
6. *Леонов Е.Г.* Расчет содержания фаз и давления при замерзании водосодержащих сред в заколонном и межколонном пространствах скважин при промерзании / Е.Г.Леонов, О.Ю.Зайцев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2005. № 1. С. 10-16.
7. *Макарьев Л.Б.* Минерально-сырьевая база урана южной окраины Сибирской платформы / Л.Б.Макарьев, И.И.Царук // Материалы Четвертого международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство», 28-30 ноября 2017; Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья. М., 2017. С. 60-61.
8. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем / С.Е.Рудов, В.Я.Шапиро, И.В.Григорьев, О.А.Куницкая, О.И.Григорьева // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 73-78. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-73-78
9. *Медведский Р.И.* Строительство и эксплуатация скважин на нефть и газ в вечномерзлых породах. М.: Недра. 1987. 230 с.



10. О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерзлых пород / Ю.А.Арсентьев, А.П.Назаров, Ю.В.Забайкин, А.Г.Иванов // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. 2019. № 21. С. 27-32.
11. *Полозков А.В.* Особенности расчета давлений гидроразрыва многолетнемерзлых пород и аномальных давлений, воздействующих на крепь скважин при обратном промерзании // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2000. № 4. С. 14-22.
12. *Шестернев Д.М.* Горно-геологическая среда месторождений полезных ископаемых Забайкалья в условиях изменения климата / Д.М.Шестернев, А.Г.Верхотуров; Забайкальский государственный университет. Чита, 2014. 227 с.
13. A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data / S.Westermann, T.I.Ostby, K.Gisnas, T.V.Schuler, B.Etzelmüller // The Cryosphere. 2015. Vol. 9. P. 1303-1319. DOI: org/10.5194/tc-9-1303-2015
14. *Huang A.* Effects of a coupling agent on the mechanical and thermal properties of ultrahigh molecular weight polyethylene/nanosilicon carbide composites / A.Huang, R.Su, Y.Liu // Journal of Applied Polymer Science. 2013. Vol. 129. Iss. 3. P. 1218-1222.
15. *Kamarainen J.* Studies in Ice Mechanics / Helsinki University of Technology. Helsinki, 1993. 182 p.
16. *Khademi Zahedi R.* Application of a finite element method to stress distribution in buried patch repaired polyethylene gas pipes / R.Khademi Zahedi, M.Shishesaz // Underground Space. 2019. Vol. 4 (1). P. 48-58. DOI: org/10.1016/j.undsp.2018.05.001
17. Patterns and Features of Global Uranium Resources and Production / F.Wang, Z.Song, X.Cheng, H.Ma // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. Institute of Physics Publishing (UK). 2017. Vol. 94. P. 1-7.
18. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites / J.A.Saunders, B.E.Pivetz, N.Voorhies, R.T.Wilkin // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 183. P. 67-83. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.08.049
19. Stability Performance Assessment of Pipelines under Hydrostatic Pressure / T.Zirakian, F.Riahi, D.Boyajian, M.Mohammadi, A.Behravesh // Current Trends in Civil & Structural Engineering. 2019. Vol. 1 (5). P. 1-9. DOI: 0.33552/CTCSE.2019.01.000524
20. World distribution of uranium deposits (UDEPO) with uranium deposit classification // International Atomic Energy Agency (IAEA), Austria. Vienna, 2009. 126 p.

Авторы: **В.А.Стетюха**, д-р техн. наук, профессор, intel@zabgu.ru (Забайкальский государственный университет, Чита, Россия), **И.И.Железняк**, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, lgc255@mail.ru (Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия).

Статья поступила в редакцию 29.08.2019.

Статья принята к публикации 19.11.2019.