

# РАСЧЕТ ТРУБЫ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ В СКВАЖИНЕ В МАССИВЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Илья Иосифович Железняк<sup>1</sup>,

lgc255@mail.ru

Владимир Алексеевич Стетуха<sup>2</sup>

intel@zabgu.ru

<sup>1</sup>Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН  
Россия, Чита

<sup>2</sup>Забайкальский государственный университет  
Россия, Чита

**Актуальность работы** связана с особенностями загрузки трубы внешним давлением в вертикальной скважине, расположенной в массиве многолетнемерзлых пород. Ее результаты направлены на обеспечение эксплуатационной надежности и эффективности геотехнологических, инженерно-геологических и гидрогеологических скважин.

**Цель работы** – оценка способности трубы из полимерного материала выдерживать приложенную к ней нагрузку.

**Методология исследования.** Исследуются условия работы вертикальной трубы из полимерного материала в скважине различного назначения с учетом основных климатических и геокриологических факторов, характерных для северной части криолитозоны Забайкальского края. Дополнительная нагрузка задается внешним воздействием, вызываемым замерзанием воды в замкнутом затрубном пространстве сопровождающимся деформацией трубы при обжатии ее льдом. Для исследования процессов были использованы методы термодинамики. Исследовано напряженно-деформированное состояние упругой модели трубы из полимерного материала. При определении внутренних усилий использован программный комплекс ЛИРА.

**Результаты.** Решена задача нелинейного теплопереноса в условиях распространения многолетнемерзлых пород. Выполнен расчет трубы на прочность и устойчивость в условиях ее сжатия льдом в условиях замкнутого пространства. Установлена зависимость несущей способности трубы от ее диаметра, толщины слоя льда в затрубном пространстве и от характеристик материала. Определено сочетание параметров, которые могут приводить к потере устойчивости трубы или к ее разрушению.

**Выводы.** Обоснована необходимость разработки специальных размеров труб с заданной толщиной стенки, обеспечивающих их устойчивость при загрузке внешним давлением, создаваемым при замерзании воды в затрубном пространстве в условиях наличия отрицательных температур вмещающей геологической среды.

**Ключевые слова:** скважина, труба, многолетнемерзлые породы, промерзание, обжатие льдом, прочность, устойчивость.

**В**ведение  
В северных регионах России, Канады, в Гренландии разведаны крупные месторождения полезных ископаемых [1–3]. Некоторые из них находятся в стадии освоения, некоторые – в стадии подготовки к освоению. Геокриологические условия в регионах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) в Северной Атлантике и в России приводятся в работах [4, 5]. При этом особенности горно-геологической среды осложняют ведение работ [5, 6]. Так, например, авторы публикации [6] к ряду актуальных проблем добычи урана на руднике Хиагда в криолитозоне Забайкалья методом подземного выщелачивания относят проникновение метеорных (атмосферных) вод в заколонное пространство в зоне мерзлых пород, в результате замерзания которых происходит смятие или разрушение колонны. При этом резкий перепад температуры в ходе эксплуатации скважин с полиэтиленовыми обсадными трубами (ПНД) вызывает повреждение полимерных труб в виде разрыва резьбовых соединений, нарушения целостности колонны и др. Решение указанных проблем должно исключить угрозу попадания растворов в водоносные горизонты [7]. Как указано в работе [6], опыт эксплуатации скважин с обсадными полимерными трубами в условиях ММП в мире отсутствует, а по существу, находится на стадии накопления.

Известно, что при добыче полезного ископаемого геотехнологическим методом через вертикальные скважины в качестве рабочей используется труба из полимерного материала, отличающаяся высокой технико-экономической эффективностью по сравнению с трубами из других материалов. Для добычи полезных ископаемых в криолитозоне предназначены трубы, способные работать при отрицательной температуре до  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , как в сезонно мерзлом (СМС) или сезонно талом (СТС) слоях, так и в толще ММП. Основными инженерно-геокриологическими характеристиками СМС, СТС и ММП являются их мощность, температура и глубина залегания горизонта годовых нулевых амплитуд температуры, ниже которой температура ММП не изменяется, а также наличие и характер грунтовых вод. В порах СМС и СТС, сложенных тонкодисперсными породами, содержится лед, образовавшийся в результате замерзания свободной воды, а в нанопорах может содержаться переохлажденная (пленочная) вода, отрицательная температура которой варьирует в диапазоне от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже [8].

Опыт показывает, что в таких инженерно-геокриологических условиях в случае замерзания воды между стенкой скважины и эксплуатационной колонной (далее трубой) необходимо учитывать возможность повреждения трубы за счет ее смятия внешним давлением при образовании льда в затрубном пространстве. Следует отметить, что вопросы распределения внешнего давления на трубопроводы, исследования нагрузки на конструкции в мерзлых породах и технологические риски использования обсадных труб в условиях криолитозоны рассматривались в публикациях [9–11]. Однако исследования работы трубы из полимерного материала на прочность при ее сжатии льдом в заколонном пространстве скважины уделено явно незначительное внимание.

В связи с этим представляется актуальной задача расчета трубы из полимерного материала на смятие внешним давлением при образовании льда в затрубном пространстве вертикальных (или наклонных) скважин различного назначения в криолитозоне, например, в северной геокриологической зоне Забайкалья с наиболее суровыми климатическими условиями. Целью настоящего исследования является изучение работы трубы на прочность и устойчивость при действии внешнего давления, вызванного замерзанием воды в затрубном пространстве. Результаты этих исследований

послужат повышению качества проектирования и обеспечат безопасные для окружающей среды условия ведения работ в регионе, характеризуемом распространением ММП [12].

#### Геокриологическая характеристика северо-западной части криолитозоны Забайкалья

Наиболее полная и объективная характеристика геокриологической обстановки в Забайкалье представлена в обобщающих трудах [13–15]. В результате районирования криолитозоны этого региона выделено три характерных района, из которых наиболее сложным для освоения месторождений полезных ископаемых геотехнологическими методами с использованием глубоких скважин представляется северо-западный. Ведущую роль в нем играют высокое положение над уровнем моря и гористость территории, резко континентальный климат, характеризующийся отрицательной среднегодовой температурой воздуха (достигающей, например, в с. Чара  $-7,8$  °С), формирующейся под влиянием сибирского антициклона в зимний период, а также малая высота снежного покрова. Эти условия определяют пространственные особенности распространения, залегания и состояния ММП, преимущественно сплошного распространения, мощностью от десятков до сотен метров с температурой на глубине нулевых годовых амплитуд  $-0,2$  °С...  $-2,0$  °С. Мощность сезонно талого слоя в этом районе достигает 2,0–3,0 м. Температура воздуха в зимний период опускается до  $-45$  °С. По данным исследований [13], в районах Центрального Забайкалья среднемесячные температуры мерзлых пород на глубине 2 м в феврале–марте могут достигать  $-8,0$  °С, на глубине 6 м понижаются до  $-4,0$  °С при средних значениях  $-1,0$ ... $-3,0$  °С. Из приведенных данных следует, что максимальные значения температурных напряжений и деформаций формируются при промерзании СТС в зимний период. В таких условиях вероятность замерзания воды в затрубном пространстве в скважинах при остановках технологического цикла остается высокой.

#### Методика оценки напряженно-деформированного состояния пластмассовой трубы

Не обсуждая конкретные источники, причины и механизмы проникновения воды и ее замерзания в заколонном пространстве, а также их связи с технологическими условиями, рассмотрим расчет трубы из полимерного материала в следующем порядке.

1. Производится теплотехнический расчет по методике одного из авторов [12]. Определяются температурные поля в затрубном пространстве, в сезонно талом слое, а также в толще многолетнемерзлого массива. Учитываются рекомендации по использованию характеристик температурного режима ММП, приводимые в СН 510-78 (СН 510-78. Инструкция по проектированию сетей водоснабжения и канализации для районов распространения вечномерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 1979. 70 с.). Расчет производится для периодов монтажа, начальной стадии эксплуатации, аварийной остановки и ремонта скважины. Рассматривается труба, не заполненная жидкостью. Результаты расчета подтверждают возможность замерзания воды в затрубном пространстве.

2. Производится расчет трубы в упругой стадии ее работы при размещении трубы в пределах СТС (при средней зимней и средней абсолютно минимальной зимней температуре) или в толще многолетнемерзлого массива пород. В качестве примера рассмотрим работу труб из непластифицированного поливинилхлорида (НПВХ) и полиэтилена (ПНД), установленных в вертикальной скважине. Принимаем, что замерзание воды вокруг трубы происходит в замкнутом пространстве, т. е. без возможности бокового расширения, что приводит к обжатию трубы за счет увеличения объема воды на 9 % при фазовом переходе воды в лед. Основные параметры и свойства материалов труб принимаются по ГОСТ Р 51613 (ГОСТ Р 51613–2000. Трубы напорные из непластифицированного поливинилхлорида. Технические условия. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2000. 21 с.) и ГОСТ 18599 (ГОСТ 18599–2001. Трубы напорные из полиэтилена низкого давления. Технические условия. Минск, 2003. 45 с.). Характеристики материала труб (модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , плотность материала  $\rho$ , предел прочности  $\sigma_b$ ; предел текучести  $\sigma_T$ ) приводятся в таблице.

Вычисления выполняются методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса ЛИРА. Оценка температурных деформаций мерзлых пород рассматривается в работах [16, 17]. С учетом известных величин деформаций, вызываемых замерзанием воды, определяется внешнее давление на трубу и кольцевые усилия, создаваемые

#### Результаты расчета труб на прочность и устойчивость.

#### The results of the calculation of pipes for strength and stability.

Исходные данные для расчета	Параметры расчетной схемы и результаты вычислений				
Диаметр трубы, мм	90	110	140	160	160
Толщина стенки, мм	6,7	8,1	10,3	11,8	20
Прослойка льда, мм	20	40	20	20	20
Величина деформации, мм	1,8	3,6	1,8	1,8	1,8
Труба из поливинилхлорида (НПВХ)	$q = 17690$ кН/м <sup>2</sup>	$q = 28\ 570$ кН/м <sup>2</sup>	$q = 11\ 380$ кН/м <sup>2</sup>	$q = 10\ 140$ кН/м <sup>2</sup>	$q = 8888$ кН/м <sup>2</sup>
$E = 3000$ МПа	$\sigma_y = 111\ 000$ кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y = 180\ 000$ кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y = 71\ 700$ кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y = 63\ 500$ кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y = 35\ 500$ кН/м <sup>2</sup>
$\nu = 0,36$	$\rho_{кр} = 2188$ кН/м <sup>2</sup>	$\rho_{кр} = 2115$ кН/м <sup>2</sup>	$\rho_{кр} = 2104$ кН/м <sup>2</sup>	$\rho_{кр} = 2142$ кН/м <sup>2</sup>	$\rho_{кр} = 13\ 464$ кН/м <sup>2</sup>
$\rho = 1,4$ т/м <sup>3</sup>					
$\sigma_T = 45$ МПа					
$\sigma_b = 66$ МПа					
Труба из полиэтилена (ПНД)	$q = 4682$ кН/м <sup>2</sup>	$q = 7636$ кН/м <sup>2</sup>	$q = 3017$ кН/м <sup>2</sup>	$q = 2686$ кН/м <sup>2</sup>	$q = 5294$ кН/м <sup>2</sup>
$E = 800$ МПа	$\sigma_y = 29\ 100$ кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y = 48\ 000$ кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y = 19\ 000$ кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y = 16\ 800$ кН/м <sup>2</sup>	$\sigma_y = 18\ 500$ кН/м <sup>2</sup>
$\nu = 0,32$	$\rho_{кр} = 692$ кН/м <sup>2</sup>	$\rho_{кр} = 667$ кН/м <sup>2</sup>	$\rho_{кр} = 887$ кН/м <sup>2</sup>	$\rho_{кр} = 904$ кН/м <sup>2</sup>	$\rho_{кр} = 5197$ кН/м <sup>2</sup>
$\rho = 0,945$ т/м <sup>3</sup>					
$\sigma_T = 25$ МПа					
$\sigma_b = 27$ МПа					

мые в ее стенках. Деформации стенок скважины в мерзлых породах не учитываются. Расчетная модель трубы, формируемая программным комплексом ЛИРА, приводится на рис. 1, размещение трубы в скважине – на рис. 2.

Величина критического давления, способного привести к потере устойчивости конструкции, вычисляется по формулам [18]. Если сжимающее напряжение в стенках трубы меньше предела пропорциональности материала, критическое давление определяется по формуле

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

где  $h$  – толщина стенки трубы;  $R$  – радиус трубы.

Если напряжение в трубе превышает предел пропорциональности, критическое давление предлагается определять из выражения

$$P_{кр} = \frac{h}{R} \cdot \sigma_T \left( 1 + 4 \frac{\sigma_T \cdot R^2}{E h^2} \right)^{-1},$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала, из которого изготовлена труба.

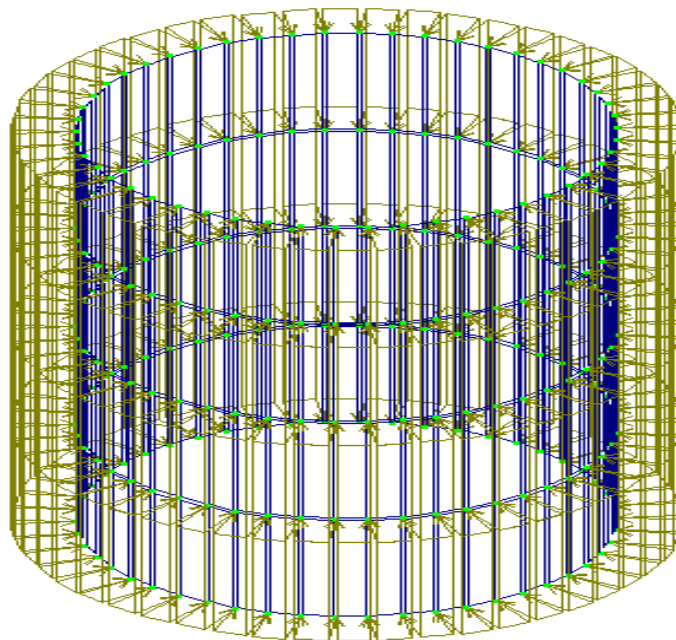


Рисунок 1. Расчетная схема трубы при загрузке внешней нагрузкой.  
Figure 1. The pipeline design scheme with an external load.

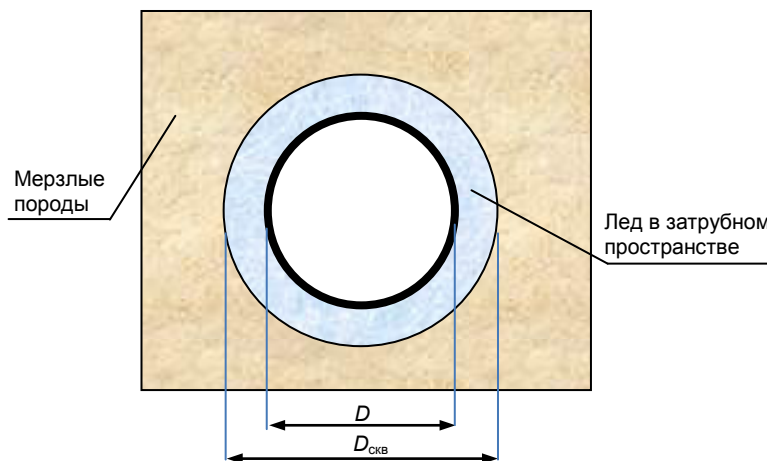


Рисунок 2. Размещение трубы в скважине при наличии льда в затрубном пространстве.  $D_{скв}$  – диаметр скважины;  $D$  – диаметр трубы.

Figure 2. Distribution of pipes in a well if there is ice in the annular space.

### Результаты

Для оценки влияния таких параметров, как толщина стенки трубы, диаметр трубы и свойства материалов на способность трубы выдерживать приложенную к ней нагрузку была проведена серия вычислений. В ходе вычислений были рассмотрены варианты с трубами диаметром 90, 110, 140 и 160 мм. Соотношение диаметров трубы и скважины определяло величину слоя льда в затрубном пространстве, приводимую в [таблице](#). При замерзании воды при расстоянии между трубой и стенкой скважины 40 мм величина деформации составляет  $\delta = 3,6$  мм; при расстоянии 20 мм  $\delta = 1,8$  мм.

С использованием расчетной модели ([рис. 1, 2](#)) были получены значения внешнего давления  $q$ , необходимого для того, чтобы труба получила указанные деформации ([таблица](#)). Одновременно определялись значения кольцевых напряжений в трубе  $\sigma_r$ , соответствующие величинам внешнего давления  $q$ , а также критическая нагрузка на трубу, приводящая к потере ее устойчивости ([таблица](#)).

Как следует из приводимых в [таблице](#) результатов, сжимающие кольцевые напряжения в стенке трубы превышают предел прочности материала для труб ПВХ и ПНД диаметром 90 и 110 мм, а также для трубы ПВХ диаметром 140 мм. Все рассмотренные варианты труб с размерами, отвечающими стандартам (столбцы 2–5), теряют устойчивость при замерзании воды в затрубном пространстве даже при образовании небольших по толщине прослоек льда, рассмотренных в примерах. Следовательно, наибольшую угрозу для труб при исследуемом характере загрузки представляет потеря устойчивости. Как видно из результатов, приводимых в [таблице](#), в трубах из полиэтилена возникают меньшие по величине внешние нагрузки и внутренние кольцевые напряжения при замерзании воды. Это происходит благодаря их более высокой способности деформироваться. Значительная жесткость материала и малые размеры труб не позволяют развиваться деформациям, вызываемым замерзанием воды в скважине, что приводит к увеличению внешней нагрузки и внутренних усилий. В то же время их прочностные характеристики уступают поливинилхлориду. В качестве примера в столбце 6 таблицы рассматриваются трубы с утолщенной примерно в 2 раза стенкой по сравнению со стандартами. Как видно из результатов вычислений, такая труба из ПВХ удовлетворяет условиям прочности и устойчивости при рассмотренных размерах прослоек льда. Труба ПНД с увеличенной толщиной стенки также удовлетворяет условию прочности, а условие устойчивости не удовлетворяется лишь на 1,8 %.

### Выводы

При использовании пластмассовых труб в условиях отрицательных температур среды, в которой они размещаются, необходимо учитывать вариант их загрузки внешним давлением, создаваемым при замерзании воды в затрубном пространстве. Расчет на указанную нагрузку должен исключать риски потери устойчивости и разрушения конструкции. Для использования труб из полимерных материалов в условиях распространения ММП можно рекомендовать разработку труб специальных размеров с большей толщиной стенки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Feifei Wang, Zisheng Song, Xianghu Cheng, Huanhuan Ma. Patterns and Features of Global Uranium Resources and Production // Earth and Environmental Science: IOP Conf. Series. Bristol, England: IOP Publishing. 2017. Vol. 94. P. 1–7.
2. World distribution of uranium deposits (UDEPO) with uranium deposit classification. Vienna: IAEA, 2009. October. 2009. 126 p.
3. Наумов С. С. Сырьевая база урана. Положение России на мировом рынке урана: реалии и перспективы // Горный журнал. 1999. № 12. С. 12–17.
4. Westermann S., Østby T. I., Gislén K., Schuler T. V., Eitzelmüller B. A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data // The Cryosphere. 2015. Vol. 9. P. 1303–1319.
5. Шестернев Д. М., Верхотуров А. Г. Горно-геологическая среда месторождений полезных ископаемых Забайкалья в условиях изменения климата: монография. Чита: ЗабГУ, 2014. 227 с.
6. Солодов И. Н., Гладышев А. В., Иванов А. Г. Опыт добычи урана методом СПВ в криолитозоне // Уран: геология, ресурсы, производство: материалы Четвертого междунар. симпоз. (28–30 нояб. 2017 г.). М.: ВИМС, 2017. С. 105–107.
7. Saunders J. A., Pivetz B. E., Voorhies N., Wilkin R. T. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 183. P. 67–83.
8. Бордонский Г. С., Орлов А. О., Хапин Ю. Б. Коэффициент затухания и диэлектрическая проницаемость переохлажденной объемной воды в интервале температур 0...–90 °С на частотах 11...140 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 255–270.
9. Kou Y., Shukla S. K., Mohyeddin A. Experimental investigation for pressure distribution on flexible conduit covered with sandy soil reinforced with geotextile reinforcement of varying widths // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 80. P. 151–163.
10. Yang Z., Li Q., Horazdovsky J., Leroy H., Marx E. Analysis of laterally loaded piles in frozen soils // Geotechnical Special Publication. 2012. 225 GSP. P. 215–224.
11. Atlasov R., Nikolaeva M., Skryabin R. Technology of reaming before running casing under permafrost conditions // 17<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017 (Albena, Bulgaria, 29 June–5 July 2017 г.). 2017. Vol. 17, Issue 14. P. 927–932.
12. Стетьуха В. А. Оценка эффективности природоохранных технологий при ведении горных работ в условиях многолетнемерзлых пород // Изв. вузов. Горный журнал. 2006. № 6. С. 43–50.
13. Шполянская Н. А. Вечная мерзлота Забайкалья. М.: Наука, 1978. 132 с.
14. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / под ред. Э. Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 514 с.
15. Zheleznyak I. I., Chernykh E. N., Chechel'nitskii V. V. Investigation of Combined Seismic and Geocryologic Conditions for Northern Trans-Baikal // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2017. Vol. 54, Issue 5. November. P. 336–340.
16. Roman L. T., Merzlyakov V. P., Maleeva A. N. Thermal deformation of frozen soils: role of water and gas saturation // Kriosfera Zemli. 2017. Vol. XXI, № 3. P. 23–29.
17. Merzlyakov V. P., Rudykh O. L. On the Coefficient of Temperature Expansion of Frozen Soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2010. Vol. 47, Issue 5. December. P. 180–188.
18. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. Т. 2. Более сложные вопросы и задачи. М.: Наука, 1965. 480 с.

Статья поступила в редакцию 6 июня 2018 г.



# Calculation of a pipe from a polymer material under an external load in a well in the rock mass of permafrost

Il'ya Iosifovich Zheleznyak<sup>1</sup>,

lgc255@mail.ru

Vladimir Alekseevich Stetyuha<sup>2</sup>

intel@zabgu.ru

<sup>1</sup>Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology  
of the Siberian Branch of RAS

Chita, Russia

<sup>2</sup>Transbaikalian State University

Chita, Russia

**Relevance of the work** is related to the peculiarities of loading the pipe with external pressure in a vertical well located in the rock mass of permafrost. Its results are aimed at ensuring operational reliability and efficiency of geotechnological, engineering-geological and hydro-geological wells.

**Purpose of this work is to** evaluate the ability of a pipe made of polymer material to bear a load.

**Methodology of research.** The working conditions of a vertical pipe made of polymer material in wells of various purposes are examined with consideration of the main climatic and geocryological factors typical of the northern part of cryolithic zone of the Zabaikalye Territory. Additional load is set by an external action caused by freezing of water in a closed annular space accompanied by deformation of the pipe when it is compressed by ice. Methods of thermodynamics were used to study the processes. The stressed-deformed state of an elastic model of the pipe made of polymer material is studied. In determining internal efforts, the LIRA software application was used.

**Results.** The problem of nonlinear heat and mass transfer in the conditions of permafrost is solved. The pipe is calculated for strength and stability under conditions of its compression by ice in annular space. The dependence of the pipe supporting capacity on its diameter, thickness of the ice layer in the annular space and the characteristics of the material is established. The combination of parameters which can lead to loss of stability of the pipe or to its destruction is defined.

**Conclusion.** The necessity of the development of special sizes of pipes with a specified wall thickness is justified. This ensures their stability at loading with external pressure when water freezes in the annular space in terms of negative temperatures of the host geological terrain.

**Keywords:** well, pipe, permafrost, freezing, ice compression, strength, stability.

## REFERENCES

1. Feifei Wang, Zisheng Song, Xianghu Cheng, Huanhuan Ma. 2017, Patterns and Features of Global Uranium Resources and Production. Earth and Environmental Science: IOP Conf. Series. Bristol, England: IOP Publishing, vol. 94, pp. 1–7.
2. 2009, World distribution of uranium deposits (UDEPO) with uranium deposit classification. Vienna: IAEA, October. 126 p.
3. Naumov S. S. 1999, *Syr'yevaya baza urana. Polozheniye Rossii na mirovom rynke urana: realii i perspektivy* [The raw material base of uranium. Russia's position in the world uranium market: realities and prospects]. *Gornyi Zhurnal* [Mining journal], no. 12, pp. 12–17.
4. Westermann S., Østby T. I., Gislås K., Schuler T. V., Etzelmüller B. 2015, A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data. *The Cryosphere*, vol. 9, pp. 1303–1319.
5. Shesternev D. M., Verkhoturov A. G. 2014, *Gorno-geologicheskaya sreda mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Zabaykal'ya v usloviyakh izmeneniya klimata* [Mining and geological environment of the deposits of minerals in Transbaikalia under conditions of climate change]: monograph. Chita, 227 p.
6. Solodov I.N., Gladyshev A.V., Ivanov A.G. 2017, *Opyt dobychi urana metodom SPV v kriolitozone* [The experience of uranium mining using the SPV method in the cryolithozone]. Uranium: geology, resources, production: proceedings of the Fourth International academic conference (28-30 November 2017). Moscow, P. 105-107.
7. Saunders J. A., Pivetz B. E., Voorhies N., Wilkin R. T. 2016, Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites. *Journal of Environmental Management*, vol. 183, pp. 67–83.
8. Bordonsky G. S., Orlov A. O., Khapin Yu. B. 2017, *Koeffitsiyent zatukhaniya i dielektricheskaya pronitsayemost' pereokhlazhdennoy ob'yemnoy vody v intervale temperatur 0...–90 °S na chastotakh 11...140 GGts* [The attenuation coefficient and the dielectric constant of supercooled bulk water in the temperature range 0 ...– 90 ° C at frequencies of 11 ... 140 GHz]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], vol. 14, no. 3, pp. 255–270.
9. Kou Y., Shukla S. K., Mohyeddin A. 2018, Experimental investigation for pressure distribution on flexible conduit covered with sandy soil reinforced with geotextile reinforcement of varying widths. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 80, pp. 151–163.
10. Yang Z., Li Q., Horazdovsky J., Leroy H., Marx E. 2012, Analysis of laterally loaded piles in frozen soils. *Geotechnical Special Publication*. 225 GSP, pp. 215–224.
11. Atlasov R., Nikolaeva M., Skryabin R. 2017, Technology of reaming before running casing under permafrost conditions. 17<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017 (Albena, Bulgaria, 29 June–5 July 2017 r.), vol. 17, issue 14, pp. 927–932.
12. Stetyukha V. A. 2006, *Otsenka effektivnosti prirodookhrannyykh tekhnologiy pri vedenii gornyykh rabot v usloviyakh mnogoletnemerzlykh porod* [Evaluation of the effectiveness of environmental technologies in mining operations in permafrost conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyi Zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 6, pp. 43–50.
13. Shpolyanskaya N. A. 1978, *Vechnaya merzlota Zabaykal'ya* [The permafrost of the Transbaikalia]. Moscow, 132 p.
14. 1989, *Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'niiy Vostok* [Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East]. Ed. by E.D. Ershov. Moscow, 514 p.
15. Zheleznyak I. I., Chernykh E. N., Chechel'nitskii V. V. 2017, Investigation of Combined Seismic and Geocryologic Conditions for Northern Trans-Baikal. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 54, issue 5, pp. 336–340.
16. Roman L. T., Merzlyakov V.P., Maleeva A. N. 2017, Thermal deformation of frozen soils: role of water and gas saturation. *Kriosfera Zemli*, vol. XXI, no. 3, pp. 23–29.
17. Merzlyakov V. P., Rudykh O. L. 2010, On the Coefficient of Temperature Expansion of Frozen Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. vol. 47, issue 5, pp. 180–188.
18. Timoshenko S. P. 1965, *Soprotivleniye materialov* [Resistance of materials]. Vol. 2. More complex issues and tasks. Moscow, 480 p.

The article was received on June 6, 2018