

УДК 624.139.22

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБОПРОВОДА, ПРОЛОЖЕННОГО НА УЧАСТКАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Файзуллина Эльвира Венеровна<sup>1</sup>,  
elwira.fajzullina@yandex.ru

Паршикова Мария Андреевна<sup>1</sup>,  
maryparshikowa@gmail.com

Гулин Денис Алексеевич<sup>1</sup>,  
denis.ufa@list.ru

Султанмагомедов Тимур Султанмагомедович<sup>1</sup>,  
tsultanmaga@gmail.com

Султанмагомедов Султанмагомед Магомедтагирович<sup>1</sup>,  
ftt2010@mail.ru

Насибуллин Тимур Ришатович<sup>1</sup>,  
necsapphire@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность.** В статье рассматривается проблема строительства и эксплуатации трубопроводов на участках распространения пучинистых грунтов. Рассматриваемая проблема является актуальной, поскольку одной из основных причин, осложняющих процесс прокладки трубопроводных систем в северных районах, является морозное пучение, заключающееся в многократном увеличении объема влажных грунтов при замерзании. Металл труб подземных магистральных трубопроводов при их эксплуатации на участках распространения пучинистых грунтов подвергается существенным деформациям, происходящим из-за неконтролируемых подвижек грунта вследствие процесса морозного пучения. Данное силовое взаимодействие подземного трубопровода и мерзлого грунта может стать причиной возникновения аварийных ситуаций.

**Цель:** создать 3D-модель взаимодействия трубопровода с мерзлым пучинистым грунтом для того, чтобы имитировать процесс пучения грунта и выявить графическую зависимость напряжений и деформаций, возникающих в трубопроводе, от перемещения грунта.

**Объекты:** участок трубопровода, проложенный на участках распространения пучинистых грунтов.

**Методы.** В процессе исследования была изучена литература и нормативные документы по строительству и эксплуатации сооружений в многолетнемерзлых грунтах и проведен анализ влияния пучинистых грунтов на здания и сооружения, а также проведено моделирование в программном комплексе Ansys. В работе анализируется процесс взаимодействия многолетнемерзлых грунтов с подземным трубопроводом в программном комплексе AnsysWorkbench.

**Результаты.** Авторами выполнено моделирование процесса пучения грунта и проведена оценка напряженно-деформированного состояния трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов, в программном комплексе AnsysWorkbench. С помощью разработанной модели получены и проанализированы значения напряжений и полных деформаций стенки трубы при контакте с мерзлым грунтом, построена графическая зависимость наблюдаемых величин при усилении процесса пучения и увеличении участка пучения.

### Ключевые слова:

Трубопровод, напряженно-деформированное состояние, пучение, строительство, моделирование.

### Введение

Поставка большей части всего объема добытых углеводородов потребителям по всей России и за рубежом осуществляется по нефтепроводам и газопроводам. Трубопроводные системы уже сейчас занимают 35 % территории, на которой проживает 60 % населения страны. Основные задачи – свести к минимуму техногенные воздействия в период эксплуатации и ослабить негативное влияние природных факторов на надежность конструкций и безопасность эксплуатации.

В районах Западной Сибири существует необходимость модернизации процессов строительства и эксплуатации трубопроводов для поддержания без-

опасной эксплуатации с минимальным воздействием на окружающую среду, поскольку для северных районов характерны особые климатические условия, которые усложняют процессы строительства и эксплуатации, например, участки распространения мерзлых грунтов [1, 2]. Одной из многочисленных сложностей, связанных с низкими температурами грунтов, является процесс морозного пучения грунта. Различают сезонное и многолетнее пучение, хотя физико-механические процессы, которые их вызывают, и последствия имеют одинаковый характер [3]. При промерзании происходит увеличение грунта в объеме, что вызывает подъем земной поверхности с последующей просадкой при оттаивании [4, 5].

Процессы пучения опасны для трубопровода рядом факторов: неравномерностью проявления по трассе, изменчивостью, связанной с закономерностью климата, почвенно-растительным покровом, а также минералогическим составом и строением промерзающих пород [6, 7]. Неравномерность деформации поверхности в зависимости от мощности слоя промерзания и влажности грунтов достигает больших значений, оказывая на трубопровод большие дополнительные нагрузки. Деформация грунта при многолетнем промерзании превышает деформацию при сезонном пучении из-за возможности миграции влаги к фронту промерзания [8, 9]. Распределение напряжений от пучения в значительной степени зависит от условий вдоль трассы трубопровода. Вероятность сильного пучения грунта может быть определена на основании статистических данных по скважинным образцам, с использованием данных, установленных при картировании. Воздействие сил пучения может приводить к существенным деформациям металла труб, как итог – потеря прочности, а в дальнейшем – неизбежные аварии. В первые годы эксплуатации трубопровода аварии, происходящие вследствие действия морозного пучения, наблюдаются чаще, поскольку строительные-монтажные работы, проводимые в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, приводят к нарушению физико-геологических процессов в грунтах, что, в свою очередь, может вызвать усиление интенсивности процесса пучения [4, 10].

Поскольку многолетнемерзлые грунты в мерзлом состоянии обладают большой несущей способностью, для того чтобы «не травмировать» и не растопить мерзлые грунты, прокладка трубопроводов, а также строительство в многолетнемерзлых грунтах практически осуществимы только в зимнее время [11]. Помимо этого, прокладка трубопроводов в грунтах данного типа требует применения специальных технологий, строительных машин и механизмов. Но, несмотря на все сложности, протяженность трубопроводов, проложенных на участках распространения многолетнемерзлых грунтов, достигает нескольких тысяч километров [12].

Примерами трубопроводов, прокладка которых была осуществлена на участках распространения мерзлых грунтов, могут служить такие трубопроводы, как: «Заполярье-Пурпе», «Трансаляский трубопровод», «Куюмба-Тайшет», «Сила Сибири».

Исходя из всех особенностей строительства и эксплуатации в данных регионах, можно сделать вывод о том, что еще на этапе проектирования трубопроводной системы важно выявить потенциально опасные участки трассы, на которых возможно действие сил морозного пучения грунта. Кроме этого, требуется применение обоснованных конструктивных решений по обеспечению прочности и устойчивости линейной части трубопроводов, проложенных в данных грунтах [13]. Также необходимо вести постоянный мониторинг состояния трубопровода и его напряженно-деформированного состояния, а также следить за изменением свойств грунтов, в которых проложена труба.

Для наблюдения за поведением трубопровода и оценки изменения его характеристик при контакте с многолетнемерзлыми грунтами возможно применение технологии цифровых двойников. Технология цифровых двойников объединяет физический объект с цифровым миром и описывает цифровую модель киберфизического объекта или технологического процесса. Цифровой двойник – это виртуальная интерактивная копия реального объекта, которая помогает эффективно управлять им и отслеживать его состояние при различных сочетаниях нагрузок [14, 15]. Цифровой двойник представляет собой 3D-модель, которая непосредственно связана с реальным технологическим объектом при помощи различных инженерных приборов и устройств. Также для полного функционирования цифрового двойника необходимо программное обеспечение, которое позволяет обрабатывать, накапливать и анализировать полученные с реального объекта данные.

Для того чтобы создать цифровой двойник участка трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов, прежде всего, необходимо создать 3D-модель, которая будет имитировать трубопровод, находящийся непосредственно в грунте [16]. Для построения 3D-модели был выбран программный комплекс AutoCAD. Исходные данные, использованные для построения модели, представлены в табл. 1.

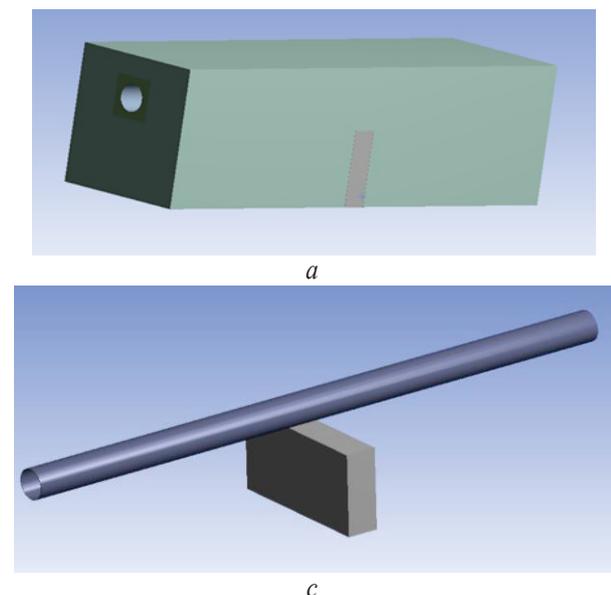
Таблица 1. Исходные данные

Table 1. Source data

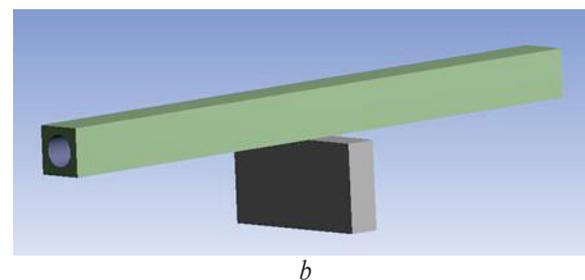
Диаметр Diameter	Толщина стенки Wall thickness	Глубина заложения Depth of laying	Длина участка Plot length	Высота грунтового массива Height of the soil massif	Ширина грунтового массива Width of the soil massif
мм/mm		м/m			
1020	20	1	20	5	5

Разработанная 3D-модель состоит из двух частей: одна часть имитирует мерзлый грунт, вторая – участок трубопровода, проложенный в данном грунте. В ходе построения модели было принято решение о выделении в части модели, имитирующей грунт, небольшого центрального участка, которому было задано перемещение по вертикальной оси с целью получения наиболее реалистичной картины процесса действия морозного пучения грунта на трубопровод. Для выявления зависимости изменения НДС трубопровода от усиления процесса пучения грунта была принята длина данного участка 1 м. В исследовании по определению зависимости НДС трубопровода при увеличении участка пучения грунта длина выделенного участка изменялась с 0 до 5 м с шагом 1 м. Также в процессе построения был выделен небольшой объем грунта, непосредственно окружающий трубу, для того чтобы при дальнейшем выполнении статического анализа методом конечных элементов была возможность задать для него более мелкую сетку, чем для остального объема грунта, с целью получения

наиболее точных значений напряжений и полных деформаций металла трубы.



Модель, созданная в программном комплексе AutoCAD, приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Разработанная 3D-модель: а) общий вид модели; б) выделенные участки грунта с трубой; в) труба с выделенным центральным участком грунта

**Fig. 1.** Developed 3D-model: a) general view of the model; b) selected sections of soil with a pipe; c) pipe with a selected central section of soil

Для расчета и оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода при взаимодействии с многолетнемерзлым грунтом созданная модель на следующем этапе разработки цифрового двойника была импортирована в программный комплекс AnsysWorkbench.

Данный программный комплекс был выбран для расчета и оценки напряженно-деформированного состояния, поскольку его возможности позволяют реалистично смоделировать процесс взаимодействия трубы с грунтом путем задания необходимых свойств составным частям 3D-модели, а также данный программный комплекс даёт возможность проведения конечно-элементного анализа напряжённо деформированного состояния модели [17].

После импорта модели в программный комплекс для части, имитирующей трубу, были заданы свойства стали, а для части, выполняющей роль грунта, – свойства, присущие глинистым грунтам [18].

С целью имитации наиболее реального поведения трубопровода при контакте с мерзлым грунтом для части модели, имитирующей грунт, была выбрана модель поведения Мора–Кулона, так как это наиболее распространенная и простая в использовании модель в современной инженерной практике, и она не требует сложного получения исходных данных [19, 20]. Если нет возможности получить все необходимые данные по преобладающим типам грунта для использования усовершенствованных моделей, то следует остановиться на использовании модели Мора–Кулона.

Модель Мора–Кулона определяется пятью входными параметрами [21]:

- модулем общей деформации  $E$ , кН/м<sup>2</sup>;
- коэффициентом Пуассона;
- сцеплением  $c$ , кН/м<sup>2</sup>;
- углом трения  $\varphi$ , град;
- углом дилатансии, определяемым исходя из значений угла внутреннего трения и вида грунта.

Данная модель поведения грунта описывает зависимость касательных напряжений, т. е. прочности на сдвиг, от действующих нормальных напряжений.

Свойства пучинистого и непучинистого грунта, используемые в расчете, представлены в табл. 2, 3 соответственно [5, 22].

**Таблица 2.** Свойства пучинистого грунта, использованные в расчете

**Table 2.** Properties of the heaving soil used in the calculation

Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Угол трения $\varphi$ , град. Friction angle $\varphi$ , °	Сцепление $c$ , Н/м <sup>2</sup> Cohesion $c$ , N/m <sup>2</sup>	Угол дилатансии, град. Dilatancy angle, °	Модуль деформации $E$ , МПа Modulus of deformation, $E$ , MPa	Коэффициент Пуассона Poisson's Ratio	Степень пучинистости Degree of heaviness
2000	22	28000	5	27	0,37	Сильнопучинистый Strongly swollen

**Таблица 3.** Свойства непучинистого грунта, использованные в расчете

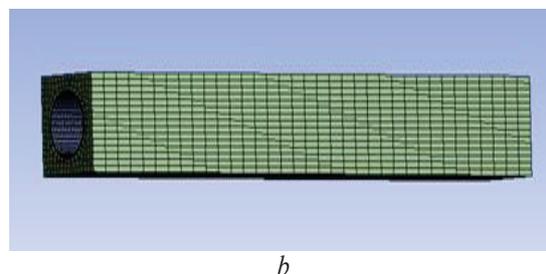
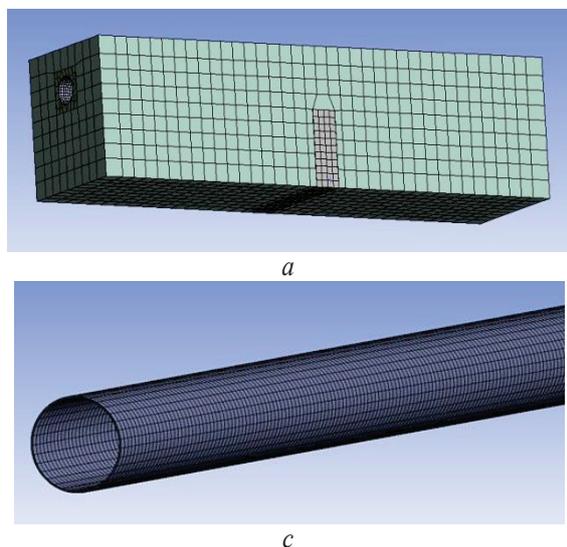
**Table 3.** Properties of the non-heaving soil used in the calculation

Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Угол трения $\varphi$ , град. Friction angle $\varphi$ , °	Сцепление $c$ , Н/м <sup>2</sup> Cohesion $c$ , N/m <sup>2</sup>	Угол дилатансии, град. Dilatancy angle, °	Модуль деформации $E$ , МПа Modulus of deformation, $E$ , MPa	Коэффициент Пуассона Poisson's Ratio	Степень пучинистости Degree of heaviness
1600	38	6000	5	48	0,32	Непучинистый Nonfrost-susceptible soil

Для проведения статического анализа методом конечных элементов в программном комплексе AnsysWorkbench полученная модель была разбита на сетку конечных элементов. Для части модели, имитирующей основную массив грунта, была создана грубая сетка, поскольку изменения, происходящие в данной части модели, не оказывают большого влияния на результаты расчета и не несут для нас практической пользы. А для части, вы-

полняющей роль трубы, был выбран Sweep метод построения и задана более мелкая сетка. Также мелкая сетка была задана и для выделенного объема грунта, непосредственно окружающего трубу, поскольку размер конечных элементов трубы и окружающего ее грунта имеет сильное влияние на результаты расчета.

Разбиение модели на сетку конечных элементов представлено на рис. 2.

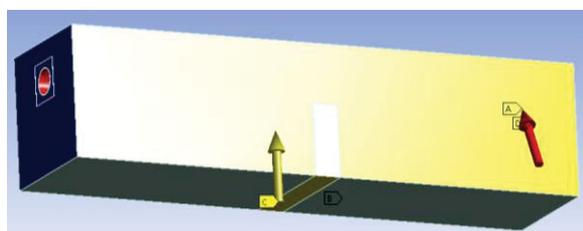


**Рис. 2.** Разбиение модели на сетку конечных элементов: а) часть модели, имитирующей грунт; б) объем грунта, окружающего трубу; в) часть модели, имитирующей трубу

**Fig. 2.** Partitioning the model into a finite element grid: a) part of the model that simulates the ground; b) selected volume of soil surrounding the pipe; c) part of the model that simulates a pipe

Число конечных элементов, равное 6350, было подобрано опытным путём. Оно является оптимальным, поскольку дальнейшее уменьшение сетки не привело к увеличению точности расчета. Измельчение сетки проводилось до тех пор, пока значения, получаемые по результатам расчета, оставались неизменными в пределах 5 %.

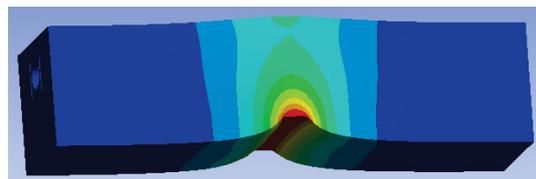
После разбиения модели на сетку конечных элементов к ней были приложены нагрузки и заданы закрепления. Было выполнено закрепление торцов модели, а также задано ограничение перемещения боковых сторон по оси  $y$ . Далее было задано внутреннее давление в трубе и вертикальное перемещение центральной части выделенного участка грунта для более наглядной имитации процесса пучения. Приложенные нагрузки и закрепления представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Нагрузки и опоры, применяемые к модели  
**Fig. 3.** Loads and supports applied to the model

Для оценки влияния интенсивности морозного пучения грунта непосредственно на напряженно-деформированное состояние трубы величину перемещения центральной части участка грунта под трубой постепенно увеличивали от 0 до 3000 мм.

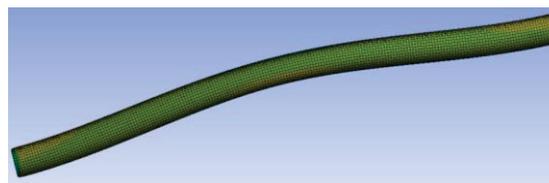
В результате расчета были получены значения деформаций и напряжений для участка трубопровода, а также наглядная картина процесса пучения грунта, которая была получена с помощью созданной модели благодаря возможности программного комплекса AnsysWorkbench. Полученная картина пучения грунта представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Картина пучения грунта, полученная с помощью созданной 3D-модели

**Fig. 4.** Picture of soil heaving obtained using the created 3D-model

На рис. 5 представлено изменённое состояние части модели, имитирующей трубопровод, при задании перемещения центральному участку грунта с целью моделирования процесса пучения.



**Рис. 5.** Состояние трубопровода при настройке движения центральной части земли

**Fig. 5.** State of the pipeline when setting the movements of the central section of the ground

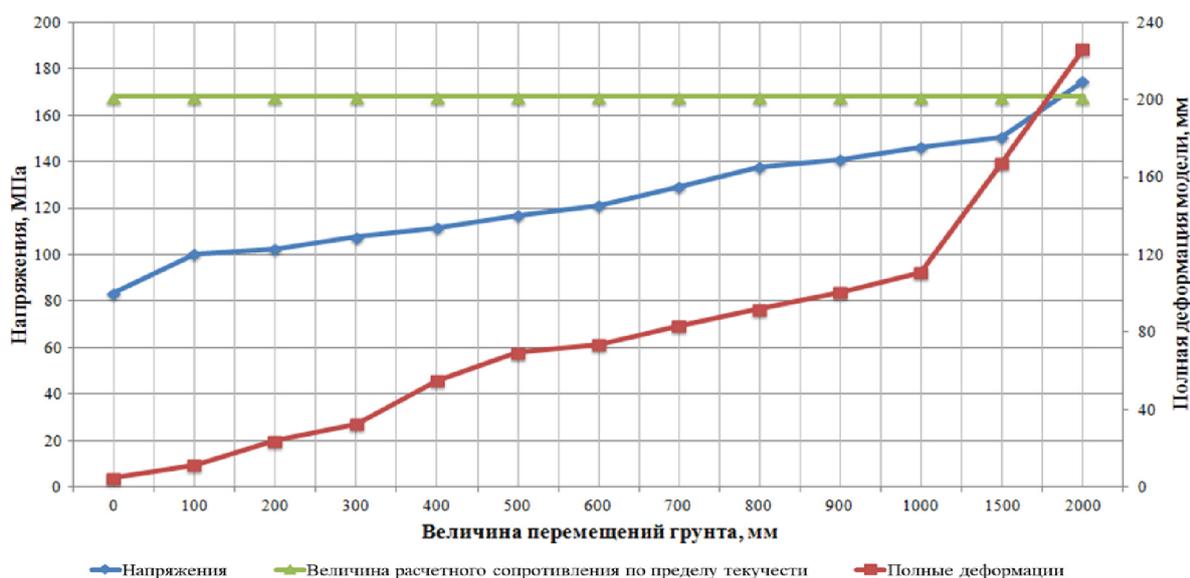
В результате проведения статического анализа напряженно-деформированного состояния созданной 3D-модели в программном комплексе Ansys-Workbench были получены значения, отражающие изменение величины напряжений в трубе и величину полной деформации металла трубы при усилении интенсивности процесса пучения грунта. Усиление интенсивности процесса морозного пучения грунта было смоделировано путем вертикального перемещения ранее выделенного центрального участка модели. Полученные данные приведены в табл. 4.

Графическая зависимость изменения величины напряжений трубопровода и полных деформаций металла трубы от интенсивности процесса морозного пучения грунта с учетом действия внутреннего давления, полученная на основе результатов статического анализа 3D-модели участка трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов, представлена на рис. 6.

**Таблица 4.** Изменение величины напряжений и суммарной деформации трубопровода при усилении интенсивности процесса морозного пучения грунта

**Table 4.** Changes in the magnitude of stresses and total deformation of the pipeline with an increase in the intensity of the process of frost heaving of the soil

Параметр Parameter	Перемещения выделенного участка грунта, мм Movement of the selected area of soil, mm						
	0	100	200	300	400	500	600
Напряжение, МПа Stress, MPa	83,5	100,2	102,4	107,6	111,7	116,9	121,3
Деформация, мм Strain, mm	4,7	11,6	23,9	32,7	55,1	69,4	73,5
Параметр Parameter	Перемещения выделенного участка грунта, мм Movement of the selected area of soil, mm						
	700	800	900	1000	1500	2000	
Напряжение, МПа Stress, MPa	129,4	137,8	140,8	146,3	150,45	174,5	
Деформация, мм Strain, mm	83,4	91,8	100,5	110,9	167,3	226,4	



**Рис. 6.** График зависимости изменения величины напряжений и суммарных деформаций трубопровода от интенсивности процесса морозного пучения грунта с учетом действия внутреннего давления

**Fig. 6.** Graph of the dependence of changes in the magnitude of stresses and total deformations of the pipeline on soil frost heaving intensity, taking into account the effect of internal pressure

По полученным графикам можно видеть, что при изменении величины вертикального перемещения грунта, то есть усилении процесса пучения, от 0 до 2000 мм наблюдается резкий скачок величины полных деформаций на участке от 1000 до 2000 мм, а также скачок напряжений на участке от 1500 до 2000 мм.

По графику видно, что в промежутке от 0 до 1500 мм напряжения медленно и плавно возрастают от 83,5 до 150,45 МПа. На участке от 1500 до 2000 мм происходит скачок напряжений от 150,45 до 174,5 МПа. Необходимо отметить, что для выбранной стали расчетное сопротивление по пределу текучести при этом составляет 168 МПа, а расчетное сопротивление по пределу прочности – 345 МПа.

Поскольку напряжения в стенке трубопровода при вертикальном перемещении центрального участка грун-

та свыше 1800 мм превосходят расчетное сопротивление по пределу текучести, необходимо на более ранних стадиях предотвращать процесс пучения, используя различные средства и методы защиты линейной части трубопровода от деформаций грунтов. Необходимо также осуществлять постоянный мониторинг состояния грунта вокруг потенциально опасных участков.

Величина полных деформаций, наблюдаемых в металле трубы при усилении процесса пучения грунта от 0 до 300 мм, плавно увеличивается от 4,7 до 32,7 мм, далее наблюдается резкий скачок величины деформаций на участке 300–500 мм от 32,7 до 69,4 мм. На участке от 500 до 1000 мм величина полных деформаций плавно возрастает до 110,9 мм. При росте бугра пучения от 1000 до 2000 мм наблюдается резкий скачок деформаций от 110,9 до 226,4 мм. Резкий

скачок деформаций может быть вызван тем, что напряжения, возникшие в стенке при перемещении центрального участка грунта на величину, превышающую 1000 мм, приблизились к значению расчетного предела текучести, а впоследствии превысили его, вследствие этого стенка трубопровода начала деформироваться без постоянно возрастающей нагрузки.

Таким образом, по полученным данным можно сказать, что наиболее опасным является промежуток вертикальных перемещений центрального участка

грунта от 1500 до 2000 мм, так как именно в этом промежутке наблюдается резкий рост как напряжений, так и полных деформаций металла трубы.

Поскольку на общем графике также можно заметить небольшие скачки, наблюдаемые на участке от 0 до 500 мм, приведем график зависимости изменения величины напряжений и полных деформаций трубопровода при изменении величины вертикального перемещения центрального участка модели для данного промежутка. Данный график представлен на рис. 7.

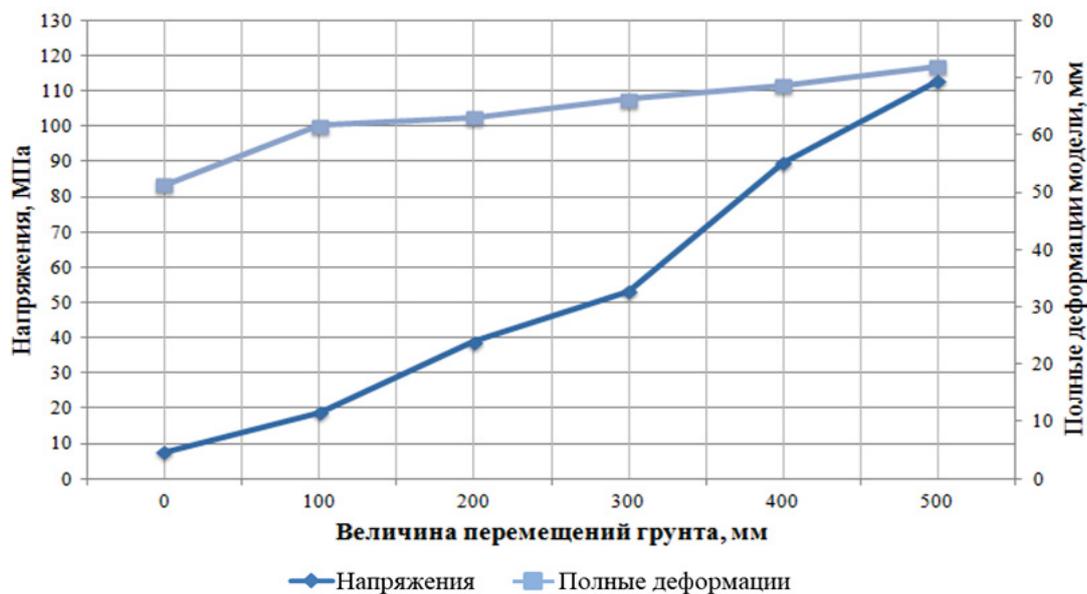


Рис. 7. График зависимости изменения величины напряжений и суммарных деформаций трубопровода при изменении величины вертикального перемещения центрального участка модели от 0 до 500 мм

Fig. 7. Graph of the dependence of the change in the magnitude of stresses and total deformations of the pipeline when the value of the vertical movement of the central section of the model changes from 0 to 500 mm

При изменении величины вертикального перемещения грунта вверх от 0 до 500 мм в промежутке от 0 до 100 мм наблюдается скачок величины полных деформаций от 4,7 до 11,6 мм, далее происходит плавное увеличение значений данной величины до 32,7 мм при вертикальном перемещении, равном 300 мм. Далее наблюдается резкий скачок величины деформаций на участке от 300 до 500 мм с 32,7 до 69,4 мм. При дальнейшем увеличении вертикального перемещения центрального участка грунта, т. е. усилении процесса пучения, стремительный рост величины полных деформаций металла трубы продолжается.

В промежутке от 0 до 100 мм наблюдается скачок напряжений от 83,5 до 100,2 МПа. При дальнейшем усилении процесса пучения до 500 мм значения напряжений остаются практически неизменными и находятся в пределах 100,2–116,6 МПа.

Наличие резких скачков, которые можно видеть на вышеприведенных графиках наблюдаемых величин на рассматриваемых участках, может говорить о потенциальной опасности «точек», в которых наблюдаются скачки. Такими точками являются точки 100 и 1500 мм, так как именно в них происходят резкие увеличения напряжений и деформаций в стенке трубы. Следовательно, необходимо более тщательное

исследование состояния трубопровода именно в этих зонах с целью обнаружения зависимости и механизма возникновения скачков данных величин. Это необходимо для дальнейшего внедрения и применения наиболее эффективных средств защиты трубопровода.

Для исследования зависимости изменения НДС трубопровода от увеличения длины участка пучения в программном комплексе AutoCAD было создано несколько 3D-моделей, в которых были выделены центральные участки грунта разной длины – от 0 до 5 м. При проведении статического анализа методом конечных элементов в программном комплексе AnsysWorkbench центральному участку грунта каждой модели задавалось одинаковое вертикальное перемещение, равное 100 мм. Полученные данные приведены в табл. 5.

По данным результатам была получена графическая зависимость изменения величины напряжений трубопровода и полных деформаций металла трубы от длины участка морозного пучения грунта с учетом действия внутреннего давления в трубе (рис. 8).

По представленным графикам видно, что при увеличении длины участка пучения от 0 до 5000 м напряжения в трубе медленно и плавно возрастают от 83,5 до 115,94 МПа, что не выходит за пределы допустимых значений.

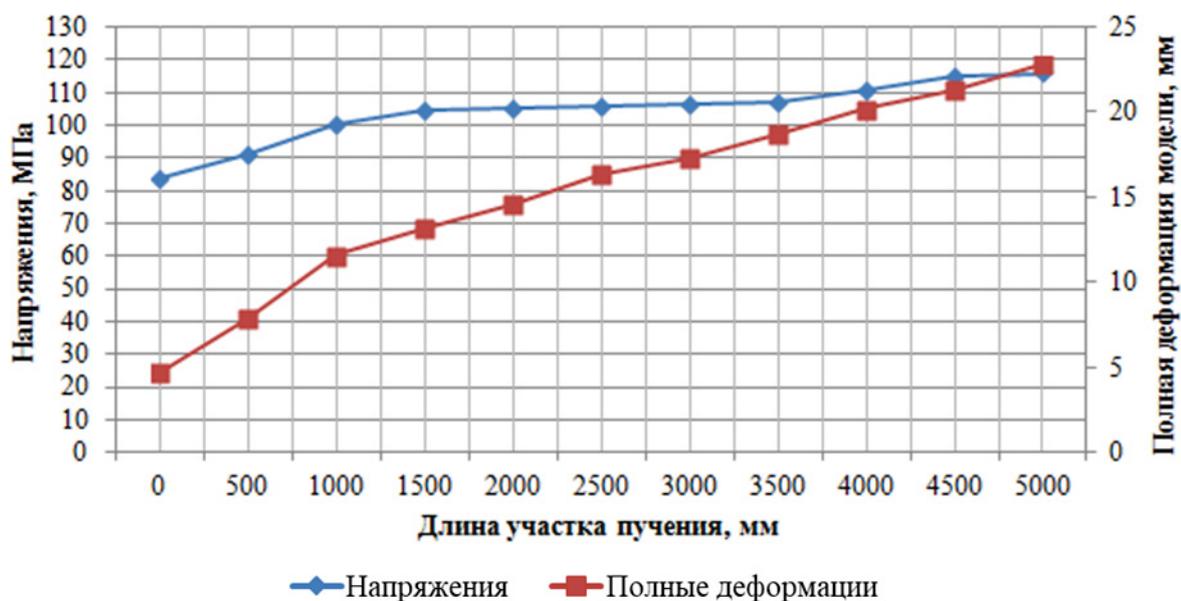


Рис. 8. График зависимости изменения величины напряжений и суммарных деформаций трубопровода от длины участка пучения грунта с учетом действия внутреннего давления

Fig. 8. Graph of the dependence of the change in the magnitude of stresses and total deformations of the pipeline on the length of the soil heaving section, taking into account the effect of internal pressure

Таблица 5. Изменение величины напряжений и суммарной деформации трубопровода за счет увеличения длины пучения грунта

Table 5. Changes in the magnitude of stresses and total deformation of the pipeline due to an increase in the length of the soil heaving

Параметр Parameter	Длина участка пучения, мм Heave section length, mm					
	0	500	1000	1500	2000	2500
Напряжение, МПа Stress, MPa	83,5	91,08	100,2	104,7	105,01	105,89
Деформация, мм Strain, mm	4,7	7,9	11,6	13,2	14,6	16,4
Параметр Parameter	Длина участка пучения, м Heave section length, m					
	3000	3500	4000	4500	5000	
Напряжение, МПа Stress, MPa	106,69	107,13	110,54	115,3	115,94	
Деформация, мм Strain, mm	17,3	18,7	20,2	21,3	22,8	

На графике, отражающем величину полных деформаций металла трубы, видно, что при увеличении длины участка пучения от 0 до 1000 мм наблюдается резкий скачок величины деформаций с 4,7 до 11,6 мм. При дальнейшем увеличении длины участка пучения до 5000 мм величина деформаций монотонно возрастает до 22,8 мм без резких скачков.

#### Заключение

Исходя из вышеприведенных данных, можно сделать вывод о том, что необходимо постоянно следить за состоянием грунта, в котором проложен трубопровод, чтобы иметь возможность на начальных этапах роста бугра пучения остановить этот процесс и предупредить его негативное влияние на трубу.

Стоит отметить, что по результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что усиление процесса пучения грунта является наиболее опасным явлением по сравнению с процессом увеличения длины участка пучения. Поэтому на всех этапах эксплуатации трубопроводной системы очень важно не допускать усиления процесса пучения грунта путем применения противопучинистых устройств и методов, направленных на борьбу с этим явлением.

Применение технологии цифровых двойников для моделирования поведения и изменения характеристик трубопровода при контакте с многолетнемерзлыми грунтами позволит осуществлять непрерывный мониторинг напряженно-деформированного состояния трубопровода, а также непрерывно наблюдать за потенциально опасными участками вдоль трассы трубопровода и оценивать влияние возможных негативных факторов на работоспособность трубопроводной системы, что будет способствовать предотвращению возможных аварий [23–24]. Кроме этого, применение данной технологии позволит более подробно и тщательно изучать процессы и явления, которые оказывают негативное влияние на конструкцию трубопроводных систем, что даст возможность подбирать наиболее эффективные методы и средства защиты линейной части магистральных трубопроводов. Помимо этого, данные о влиянии пучинистых грунтов на напряженно-деформированное состояние трубопровода, полученные при помощи цифрового двойника, позволят модернизировать уже известные методы и создать новые технологии и конструкции, применяемые для защиты сооружений, и увеличить надежность и долговечность трубопроводных конструкций, а это, в свою очередь, обеспечит безопасную транспортировку углеводородов в северных районах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Недра», 1986. – 224 с.
2. Петров А.М., Сычкина Е.Н. Анализ особенностей расчета подземных трубопроводов на пучинистых грунтах // MASTER'S JOURNAL. – 2020. – № 1. – С. 120–127.
3. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1973. – 448 с.
4. Взаимодействие систем трубопроводного транспорта и природной среды // Добыча нефти и газа. 2011. URL: <http://oilloom.ru/component/content/article/85-promyshlennaya-bezopasnost-okhrana-truda-ekologiya-strakhovanie-opasnykh-obektov/354-vzaimovliyaniye-sistem-truboprovodnogo-transporta-i-prigodnoj-sredy> (дата обращения 23.02.2022).
5. СП 22.13330.2016. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* (с Изменениями № 1, 2, 3). – М.: Стандартинформ, 2019. – 228 с.
6. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application / S. Nishimura, A. Gens, S. Olivella, R.J. Jardine // Geotechnique. – 2009. – № 3. – P. 159–171.
7. Laliberte G.E., Brooks R.H., Corey A.T. Properties of unsaturated porous media // Journal of Irrigation Draining Division. – 1968. – № 94. – P. 57–75.
8. Oswell J.M. Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons 1 // Canadian Geotechnical Journal. – 2011. – V. 48. – № 9. – P. 1412–1431.
9. Bouyuoc G.J. Movement of soil moisture from small capillaries to the large capillaries of the soil upon freezing // J. Agriculture Research. – 1923. – V. 24. – P. 427–431.
10. Review of the state of the art: interactions between a buried pipeline and frozen soil / H. Li, Y. Lai, L. Wang, X. Yang, N. Jiang, L. Li, C. Wang, B. Yang // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – V. 157. – P. 171–186.
11. Модель взаимодействия системы «подземный трубопровод – мерзлый грунт» / М.И. Николаева, Р.А. Атласова, С.С. Бердыев, А.Г. Иванов // Арктика XXI век. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 44–50.
12. Проблема пучения в трубопроводном строительстве и методы её устранения / Д.А. Гулин, Э.В. Файзуллина, Э.И. Шарипова, А.С. Глазков, М.Э. Дусалимов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 4. – С. 60–73.
13. Марков Е.В. Обеспечение проектного положения магистральных трубопроводов в условиях пучинистых грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2020. – 24 с.
14. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, В.М. Марусева, В.Ю. Кулемин // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. – 2019. – № 32. – С. 1–39.
15. Анализ влияния отклонений формы емкостного оборудования на величину возникающих максимальных напряжений / Е.Ю. Туманова, Э.Э. Габдурашитова, М.А. Паршикова, Д.О. Толстель, А.Е. Чижов // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы современной науки, достижения и инновации. – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2020. – С. 96–102.
16. Паршикова М.А., Файзуллина Э.В., Гулин Д.А. Исследование напряженно-деформированного состояния трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов // Актуальные проблемы науки и техники: XIV Междунар. науч.-практ. конф. молод. ученых. – Уфа: УГНТУ, 2021. – Т. 1. – С. 177–179.
17. Mouloud D., Boutchicha D. Simulation Numérique par ANSYSWorkbench // Fluid Structure Interaction. – 2017. – V. 4. – P. 65–89.
18. Паршикова М.А., Файзуллина Э.В., Гулин Д.А. Разработка цифрового двойника участка трубопровода, проложенного на участке распространения пучинистых грунтов // Нефтегазовый терминал. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 135–139.
19. Cheng Z., Damjanac B. Extension of Mohr–Coulomb model considering opening and closure of tension cracks // 55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – ARMA, Houston, Texas, 2021. – С. 1157.
20. Mohr–Coulomb model considering variation of elastic modulus and its application / X.Z. Cui, O. Jin, Q.S. Shang, S.T. Liu // Key Engineering Materials. – 2006. – V. 306–308. – P. 1445–1448.
21. Кудашева М.И., Калошина С.В. Сравнение модели Мора–Кулона и модели упрочняющегося грунта в программном комплексе Plaxis // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 2. – С. 87–95.
22. ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. – М.: Стандартинформ, 2013. – 11 с.
23. Experimental study of the axial movement of the pipeline in permafrost conditions with changes in soil temperature and humidity / R.N. Bakhtizin, S.M. Sultanmagomedov, T.S. Sultanmagomedov, D.A. Gulina, A.R. Urmanova // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. – 2020. – V. 10 – № 3. – P. 243–251.
24. Sultanmagomedov T. S. Influence of longitudinal displacements of the pipeline on the stress-strain state during thawing of a section of permafrost soil // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. – 2020. – V. 12 – № 4. – P. 331–339.

Поступила 15.06.2022 г.

## Информация об авторах

**Файзуллина Э.В.**, магистрант, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Паршикова М.А.**, магистрант, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Гулин Д.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Султанмагомедов Т.С.**, аспирант, ассистент кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Султанмагомедов С.М.**, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, академик РАЕН, декан Факультета трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Насибуллин Т.Р.**, старший преподаватель кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 624.139.22

## STRESS-STRAIN STATE OF A PIPELINE BURIED IN AREAS OF DISTRIBUTION OF HEAVY SOILS

**Elvira V. Fayzullina<sup>1</sup>,**  
elwira.fajzullina@yandex.ru

**Mariya A. Parshikova<sup>1</sup>,**  
maryparshikowa@gmail.com

**Denis A. Gulin<sup>1</sup>,**  
denis.ufa@list.ru

**Timur S. Sultanmagomedov<sup>1</sup>,**  
tsultanmaga@gmail.com

**Sultanmagomed M. Sultanmagomedov<sup>1</sup>,**  
ftt2010@mail.ru

**Timur R. Nasibullin<sup>1</sup>,**  
necsapphire@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

**The relevance.** The article deals with the problem of construction and operation of pipelines in the areas of distribution of heaving soils. The problem under consideration is relevant, since one of the main reasons complicating the process of laying pipeline systems in the northern regions is frost heaving, which consists in a multiple increase in the volume of wet soils during freezing. The metal of the pipes of underground trunk pipelines during their operation in the areas of the distribution of heaving soils is subjected to significant deformations due to uncontrolled movements of the soil because of frost heaving. This force interaction of the underground pipeline and frozen ground can cause emergency situations.

**The main aim** of the research is to create a 3D model of the interaction of the pipeline with frozen heaving soil in order to simulate soil heaving and to reveal graphs of the dependence of soil movement on stresses and strains that occur in the pipeline

**Objects:** section of the pipeline buried in the areas of distribution of heaving soils

**Methods.** The literature and regulatory documents on the construction and operation of structures in permafrost soils were studied and the influence of heaving soils on buildings and structures was analyzed, as well as modeling in the Ansys software package was carried out. The paper analyzes the interaction of permafrost soils with an underground pipeline in the AnsysWorkbench software package.

**Results.** The authors have modeled the process of soil heaving and evaluated the stress-strain state of the pipeline buried in the areas of the distribution of heaving soils in the AnsysWorkbench software package using digital twin technology. With the help of the developed model, the values of stresses and total deformations of the pipe wall in contact with frozen soil are obtained and analyzed, and a graphical dependence of the observed values is constructed with an increase in the heaving process and an increase in the heaving area.

### Key words:

Pipeline, stress-strain state, heaving, construction, simulation.

### REFERENCES

- Borodavkin P.P. *Mekhanika gruntov v truboprovodnom stroitelstve* [Soil mechanics in pipeline construction]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ., 1986. 224 p.
- Petrov A.M., Sychkina E.N. Analysis of the features of the calculation of underground pipelines on heaving soils. *Master's journal*, 2020, no. 1, pp. 120–127. In Rus.
- Cytovich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 448 p.
- Vzaimodeystvie sistem truboprovodnogo transporta i prirodnoy sredy [Interaction of pipeline transport systems and the natural environment]. *Dobycha nefi i gaza* [Oil and gas extraction]. Available at: <http://oilloom.ru/component/content/article/85-promyshlennaya-bezopasnost-okhrana-truda-ekologiya-strakhovanie-opasnykh-obektov/354-vzaimovliyaniye-sistem-truboprovodnogo-transporta-i-prirodnoj-sredy> (accessed 23 February 2022).
- SP 22.13330.2016. *Svod pravil. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.01-83\** (s Izmeneniyami № 1, 2, 3) [Set of rules 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNIp 2.02.01-83\* With Amendments No. 1, 2, 3]. Moscow, StandardInform Publ., 2019. 228 p.
- Nishimura S., Gens A., Olivella S., Jardine R.J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Geotechnique*, 2009, no. 3, pp. 159–171.
- Laliberte G.E., Brooks R.H., Corey A.T. Properties of unsaturated porous media. *Journal of Irrigation Draining Division*, 1968, no. 94, pp. 57–75.
- Oswell J.M. Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons 1. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, vol. 48, no. 9, pp. 1412–1431.
- Bouyuocos G.J. Movement of soil moisture from small capillaries to the large capillaries of the soil upon freezing. *J. Agriculture Research*, 1923, vol. 24, pp. 427–431.
- Li H., Lai Y., Wang L., Yang X., Jiang N., Li L., Wang C., Yang B. Review of the state of the art: interactions between a buried pipeline and frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, vol. 157, pp. 171–186.
- Nikolaeva M.I., Atlasova R.A., Berdyev S.S., Ivanov A.G. Model of the interaction of the «underground pipeline – frozen soil» system. *The arctic XXI century. Technical sciences*, 2015, no. 1, pp. 44–50. In Rus.
- Gulin D.A., Fayzullina E.V., Sharipova E.I., Glazkov A.S., Dusalimov M.E. The problem of heaving in pipeline construction and methods of its elimination. *Problems of Gathering, Treatment and*

- Transportation of Oil and Oil Products*, 2020, no. 4, pp. 60–73. In Rus.
13. Markov E.V. *Obespechenie proektnogo polozeniya magistralnykh truboprovodov v usloviyakh puchinystrykh gruntov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ensuring the design position of trunk pipelines in conditions of heaving soils. Cand. Diss. Abstract]. Tyumen, 2020. 24 p.
  14. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Kukushkin K.V., Maruseva V.M., Kulemin V.Yu. Digital twins and digital transformation of enterprises of the defense industry. *Bulletin of the East Siberian Open Academy*, 2019, no. 32, pp. 1–39. In Rus.
  15. Tumanova E.Yu., Gabdurashitova E.E., Parshikova M.A., Tolstel D.O., Chizhov A.E. Analiz vliyaniya otkloneniy formy emkostnogo oborudovaniya na velichinu voznikayushchikh maksimalnykh napryazheniy [Analysis of the influence of shape deviations of capacitive equipment on the value of the resulting maximum stresses]. *Fundamentalnye i prikladnye nauchnye issledovaniya. Aktualnye voprosy sovremennoy nauki, dostizheniya i innovatsii* [Fundamental and applied scientific research: current issues of modern science, achievements and innovations]. Ufa, Bulletin of Science Publ., 2020. pp. 96–102.
  16. Parshikova M.A., Fayzullina E.V., Gulin D.A. Issledovanie napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovoda, prolozhennogo na uchastkakh rasprostraneniya puchinystrykh gruntov [Investigation of the stress-strain state of the pipeline laid in the areas of the distribution of heaving soils]. *XIV Mezhdu-narodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh. Aktualnye problemy nauki i tekhniki* [XIV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists Actual problems of science and technology]. Ufa, Ufa State Petroleum Technological University Publ., 2021. Vol. 1, pp. 177–179.
  17. Mouloud D., Boutchicha D. Simulation Numérique par ANSYS-Workbench. *Fluid Structure Interaction*, 2017, vol. 4, pp. 65–89.
  18. Parshikova M.A., Fayzullina E.V., Gulin D.A. Razrabotka tsifrovogo dvoynika uchastka truboprovoda, prolozhennogo na uchastke rasprostraneniya puchinystrykh gruntov [Development of a digital twin of a pipeline section laid on a section of the distribution of heaving soils]. *Neftegazovy terminal* [Oil and gas terminal]. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2021. pp. 135–139.
  19. Cheng Z., Damjanac B. Extension of Mohr–Coulomb model considering opening and closure of tension cracks. *55th U.S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium*. ARMA, Houston, Texas, 2021. pp. 1157.
  20. Cui X.Z., Jin O., Shang Q.S., Liu S.T. Mohr–Coulomb model considering variation of elastic modulus and its application. *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 306–308, pp. 1445–1448.
  21. Kudashva M.I., Kaloshina S.V. Comparison of the Mohr–Coulomb model and the hardening soil model in the Plaxis software package. *Modern technologies in construction. Theory and practice*, 2017, vol. 2, pp. 87–95. In Rus.
  22. GOST 28622-2012. *Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya stepeni puchinistosti* [Interstate standard 28622-2012. Soils. Method of laboratory determination of the degree of heaviness]. Moscow, StandardInform Publ., 2013. 11 p.
  23. Bakhtizin R.N., Sultanmagomedov S.M., Sultanmagomedov T.S., Gulin D.A., Urmanova A.R. Experimental study of the axial movement of the pipeline in permafrost conditions with changes in soil temperature and humidity. *Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 243–251.
  24. Sultanmagomedov T.S. Influence of longitudinal displacements of the pipeline on the stress-strain state during thawing of a section of permafrost soil. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 331–339.

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

**Elvira V. Fayzullina**, master student, Ufa State Petroleum Technological University.

**Mariya A. Parshikova**, master student, Ufa State Petroleum Technological University.

**Denis A. Gulin**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Timur S. Sultanmagomedov**, postgraduate student, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

**Sultanmagomed M. Sultanmagomedov**, Dr. Sc., Academician of the Russian Academy of Sciences, professor, Dean of the Faculty of Pipeline Transport, Ufa State Petroleum Technological University.

**Timur R. Nasibullin**, senior lecturer, Ufa State Petroleum Technological University.