

УДК 622.692.4.053

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

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

**Бахтизин Рамиль Назифович<sup>1</sup>,**  
ramil\_bahtizin@mail.ru

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

**Урманова Аделия Радиковна<sup>1</sup>,**  
adeliyaurmanova424@gmail.com

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью проведения многочисленных экспериментальных исследований по определению влияния температуры и влажности грунта на его механические характеристики. При изменении температуры и влажности грунта меняется коэффициент Пуассона, модуль Юнга, сцепление и угол внутреннего трения грунта. Для многолетнемерзлых грунтов эти изменения значительны и влияют на напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода и на зависимость продольных перемещений от приложенных нагрузок. Разрабатываемая компьютерная модель позволит сократить количество экспериментальных исследований путем моделирования процессов взаимодействия трубопровода с грунтом методом конечных элементов.

**Цель:** разработка математической модели системы трубопровод–грунт для исследования влияния изменения температуры мерзлого грунта на напряженно-деформированное состояние трубопровода.

**Объекты:** подземные трубопроводы, проложенные в условиях многолетнемерзлых грунтов, изменяющие проектное положение в процессе эксплуатации; одновременное влияние характеристик грунта на перемещения трубопровода, подверженного нагрузкам.

**Методы:** математическое моделирование, моделирование методом конечных элементов, методы строительной механики и механики грунтов, планирование эксперимента.

**Результаты.** Проведен анализ моделей взаимодействия трубопровода с грунтом. Разработана 3D модель экспериментальной установки трубопровода в лотке с грунтовым массивом. Для грунта описаны характеристики модели геомеханической теории пластичности Мора–Кулона. Получена теоретическая зависимость продольных перемещений от приложенной продольной нагрузки. Проведено сравнение с результатами, полученными на экспериментальной установке. Обоснована необходимость мониторинга температурного поля грунта вокруг трубопровода.

### **Ключевые слова:**

Многолетнемерзлый грунт, продольные перемещения, мониторинг, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

### **Введение**

Все больше начинают развиваться технологии проектирования трубопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов. Опасность строительства трубопровода в этих условиях заключается в критическом перемещении трубопроводов вследствие воздействия оползней, оттаивания многолетнемерзлых грунтов (ММГ), карстовых образований и др. Продольные и поперечные перемещения трубопровода могут влиять на надежность установленного оборудования, арматуры, в самом трубопроводе могут возникнуть критические напряжения.

На сегодняшний день напряженно-деформированное состояние трубопровода (НДС) можно контролировать с помощью:

- мониторинга НДС интеллектуальными вставками;
- мониторинга НДС волоконно-оптическими сенсорами;
- измерения НДС в шурфах;
- пропуска диагностических снарядов;

- устройства для определения планово-высотного положения трубопроводов и др.

При эксплуатации трубопроводов в условиях ММГ встает необходимость постоянного мониторинга перемещений трубопровода, поскольку контролируемые процессы типа оползней или оттаивания грунтов могут произойти неожиданно и очень стремительно, это вынуждает контролировать трубопровод на опасных участках прокладки с возможностью немедленно принять необходимые меры.

На сегодняшний день для постоянного мониторинга абсолютных значений перемещений подземного трубопровода существуют различные устройства, например, «Устройство для определения планово-высотного положения подземных трубопроводов» [1, 2]. Однако данные устройства не измеряют значений всех значимых характеристик, таких как перемещения трубопровода, НДС трубопровода и грунта, распределение температур и влажности по трассе в различные периоды эксплуатации и характер их зависимостей друг от друга.

Система мониторинга НДС трубопровода в условиях ММГ должна обладать следующими свойствами:

- измерения в режиме реального времени – для немедленного принятия мер по устранению инцидента;
- конкурентная стоимость системы – установка системы должна быть более привлекательной для заказчика;
- надежность системы и правильность результатов – случайные подвижки грунта не должны разрушать датчики системы мониторинга и влиять на результаты измерений;
- геометрические размеры, простота и удобство эксплуатации – система должна быть удобна в транспортировке, установке и ремонте. Эти параметры также существенно влияют на стоимость и универсальность системы.

#### Цели и задачи

Целью исследования является создание математической модели системы трубопровод-грунт для разработки модели прогнозирования влияния различных свойств мерзлого грунта на взаимосвязь напряжений и перемещений трубопровода. Для этого ставятся следующие задачи:

- изучение возможностей программного комплекса ANSYS для моделирования грунтов;
- сопоставление расчетных моделей, используемых при расчете перемещений трубопровода, с моделями, предлагаемыми в ANSYS;
- проверка адекватности модели и сравнение с экспериментальными исследованиями на реальной модели при продольных перемещениях трубопровода;
- разработка методики расчета трубопровода при его кручении, продольном (вдоль оси) и поперечном перемещении (вверх), моделирование перемещений от глубины заложения и диаметра трубопровода.

#### Методы исследования

В статье рассматривается математическая модель трубопровода в мерзлом грунте. Модель позволит создавать цифровой двойник исследуемого участка трубопровода, что, в свою очередь, удешевит систему мониторинга и уточнит получаемые данные в процессе мониторинга.

Математическим и экспериментальным моделям трубопроводов на труднодоступных участках для определения перемещений посвящено достаточное количество отечественных и зарубежных исследований. В Израильском технологическом институте исследовалась модель перемещения подземного трубопровода при оттаивании мерзлого грунта. На одном из участков трубопровода грунт начинал оттаивать, изменяясь в объеме. Вследствие этого в трубопроводе возникали критические напряжения на границе перехода от оттаявшего грунта к устойчивым грунтам [3]. Анализ НДС трубопровода во время сдвига грунтового массива при разломе в геодинамических зонах показан в работе [4].

Если говорить про мониторинг НДС трубопровода на ММГ, то важно понимать, что при изменении внешних условий (влажности и температуры) изменяются строительные свойства грунта, что осложняет аналитическую взаимосвязь между перемещениями и напряжениями в грунте. Проблемы мониторинга и прогнозирования изменения температуры и влажности ММГ подробно освещены в работах [5–7].

Экспериментальные зависимости напряжений в трубе от величины сдвигов двух массивов грунта, в котором уложен трубопровод, рассматриваются в работах [8, 9]. Основной идеей исследования выступает то, что в процессе эксплуатации под действием различных факторов трубопровод изменяет первоначальное положение. Перемещение происходит также за счет того, что труба ищет свое линейно-высотное положение для минимизации напряжений и может мигрировать из первоначального положения.

Наиболее близкими к нашей работе являются исследования, выполненные в институте мерзлых грунтов. В работе [10] рассматривалась модель трехосного напряженно-деформированного состояния грунта и модель трубопровода при оттаивании его участка. Основная задача данного исследования – определить изменение перемещений трубопровода с помощью мониторинга температуры грунта. В работе [11] с помощью МКЭ анализа проведен расчет просадки трубопровода, в исследовании рассматривается модель, в которой с двух сторон используется устойчивый грунт, а в центре происходит перемещение типа осадки.

В статье исследуется зависимость перемещений от напряжений при приложении усилий вдоль оси трубопровода, по нормали к оси трубопровода и при приложении крутящего момента.

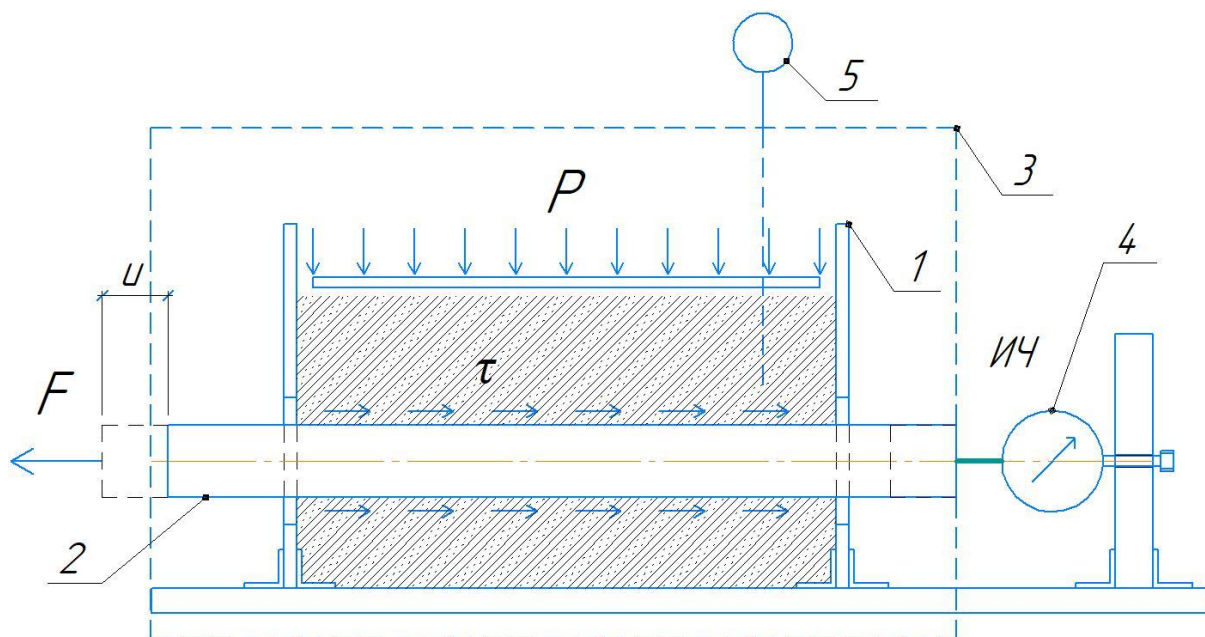
Поскольку проводить экспериментальные исследования на реальных трубопроводах для всех расчетных схем представляется дорогостоящим мероприятием, для определения влияния изменяемых характеристик грунта на НДС грунта и трубопровода предлагается рассмотреть и связать две модели:

- модель трубопровода в ANSYS для моделирования различных расчетных схем без необходимости проведения эксперимента;
- экспериментальная установка трубопровода для апробации расчетных моделей в ANSYS, расчетная схема изображена на рис. 1.

В отечественной практике проектирования трубопроводов, в частности для описания взаимодействия грунта с поверхностью трубопровода, на сегодняшний день используются следующие модели:

- модель упругого грунта В.А. Флорина;
- модель упругого грунта П.П. Бородавкина;
- модель жестко-пластичного грунта Кулона;
- модель П.П. Бородавкина и О.Б. Шадрина;
- модель непрерывной связи [12].

Обращаем внимание, что, в отличие от модели В.А. Флорина, в модели жестко-пластичного грунта Кулона нет связи напряжений с перемещениями трубопровода по контакту труба–грунт. Грунт неразрывно связан с трубопроводом (bonded – склеен), а перемещения происходят между слоями грунта.



**Рис. 1.** Экспериментальная установка для исследования перемещений в мерзлом грунте: 1 – лоток с грунтовым массивом; 2 – трубопровод; 3 – камера морозильника; 4 – фиксатор перемещений; 5 – термометр.  $F$  – сосредоточенная нагрузка;  $P$  – давление на поверхность грунта;  $u$  – перемещения трубопровода;  $\tau$  – касательные напряжения [13]

**Fig. 1.** Design of the experimental model: 1 – soil massive; 2 – pipeline; 3 – freezer; 4 – dial gauge; 5 – thermometer.  $F$  – pulling force;  $P$  – pressure on the soil surface;  $u$  – displacement;  $\tau$  – shear stress [13]

Связь величин касательных напряжений с приложенной сосредоточенной нагрузкой представлена ниже (формулы 1–3):

$$F = \tau \pi D l; \quad (1)$$

$$\tau_{\text{пр}} = \sigma \cdot \tan \varphi + c; \quad (2)$$

$$\sigma = \rho g h_{\text{сп}}. \quad (3)$$

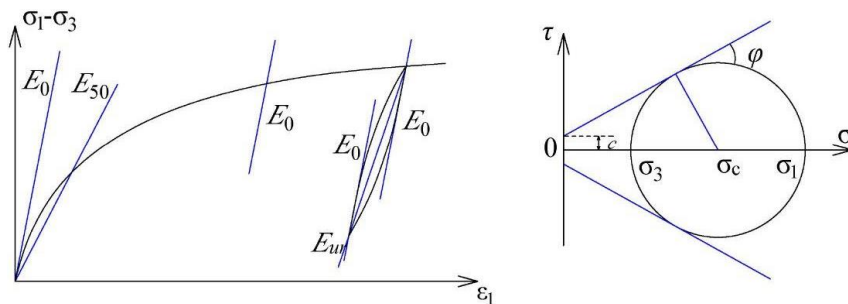
где  $F$  – сосредоточенная «выдергивающая» нагрузка;  $\tau$  – касательные напряжения, сопротивление перемещениям трубопровода;  $D$  – диаметр трубопровода;  $l$  – длина трубопровода в грунте;  $\tau_{\text{пр}}$  – предельное касательное напряжение, устанавливается равномерным по всей длине трубопровода и изменяется только при изменении нормальных напряжений по контакту труба-грунт;  $\sigma$  – нормальные напряжения, от веса грунта над трубопроводом;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $c$  – сцепление грунта;  $h_{\text{сп}}$  – средняя глубина заложения

трубопровода (расстояния от дневной поверхности грунта до оси трубопровода).

Для моделирования грунтового основания в ANSYS на сегодняшний день доступны следующие модели геомеханической теории пластичности:

- Cam-clay;
- Mohr-Coulomb;
- Jointed Rock;
- Drucker-Prager Concrete;
- Menetrey-Willam.

Для моделирования грунта в ANSYS будем использовать модели Мора–Кулона (рис. 2). На рисунке:  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение,  $\sigma_3$  – минимальное главное напряжение,  $\varepsilon_1$  – относительные деформации,  $E_0$  – модуль деформации при первичном нагружении,  $E_{50}$  – секущий модуль деформации, соответствующий 50 % прочности грунта,  $E_{\text{отр}}$  – модуль деформации при разгрузке [14, 15].



**Рис. 2.** Модель Мора–Кулона: 1) зависимость между нормальными напряжениями и осевыми деформациями при малых относительных деформациях 2) зависимость между нормальными и касательными напряжениями

**Fig. 2.** Mohr–Coulomb model: 1) the relationship between normal stresses and axial strains at small relative strains; 2) the relationship between normal and tangential stresses

Модель Мора–Кулона представляет собой зависимость касательных напряжений от величины нормальных напряжений (4):

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\varphi) + c, \quad (4)$$

где  $\tau$  – касательные напряжения, Па;  $\sigma$  – нормальные напряжения, Па;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, град;  $c$  – сцепление грунта, Па [12].

Помимо угла внутреннего трения  $\varphi$ , для описания модели Мора–Кулона требуется значение угла дилатансии  $\psi$ , который характеризуется изменением объема, наблюдаемым в зернистых материалах, когда они подвергаются сдвиговым деформациям [16]. В моделях грунта Hardening Soil и Мора–Кулона угол дилатансии принимается постоянным и для песка в среднем по плотности и плотном состоянии определялся из условия  $\psi = \varphi - 30$  град [17]. Свойства грунта, задаваемые в ходе экспериментального исследования, представлены в табл. 1.

Лабораторная установка представляет собой конструкцию из металлического лотка размерами  $0,37 \times 0,25 \times 0,17$  м и трубопровода длиной  $l=0,5$  м,  $D_n=0,05$  м, толщина стенки трубопровода  $\delta=0,0025$  м. Глубина заложения до верхней образующей  $h_0=0,01$  м.

Таблица 1. Характеристики исследуемого грунта

Table 1. Soil properties

Название Name	Среднее значение Mean
Плотность/Density, $\rho$	1300 кг/м <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
Угол внутреннего трения/Friction angle, $\varphi$	30°
Сцепление/ Cohesion, $C$	1000 Па/Па
Модуль Юнга/Young's Modulus, $E$	$1 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^6$ Па/Па
Коэффициент Пуассона/Poisson's Ratio, $\mu$	0,30
Геометрические размеры массива грунта Soil mass dimensions	$0,37 \times 0,25 \times 0,17$ м/м
Массовая влажность грунта/Soil moisture	5 %
Температура грунта/Soil temperature	5 °C

Деформации грунтов в общем случае характеризуются модулем сдвига  $G$ , модулем объемной деформации  $K$ , коэффициентом Пуассона  $\mu$  и модулем дефор-

мации  $E$ . В табл. 2 приведена взаимосвязь между этими величинами.

Таблица 2. Взаимосвязь между модулями деформаций грунтов

Table 2. Relationship between soil deformation modules

Комбинации характеристик Combinations of characteristics	Модуль сдвига, Па Shear modulus, Pa, $G$	Модуль упругости, Па Elastic modulus Pa, $E$	Модуль объемной деформации, Па Bulk modulus Pa, $K$	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio, $\mu$
$G, E$	$G$	$E$	$\frac{GE}{9G - 3E}$	$\frac{E - 2G}{2G}$
$G, K$	$G$	$\frac{9GK}{3K + G}$	$K$	$\frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$
$G, \mu$	$G$	$2G(1 + \mu)$	$\frac{2G(1 + \mu)}{3(1 - 2\mu)}$	$\mu$
$E, \mu$	$\frac{E}{2(1 + \mu)}$	$E$	$\frac{E}{3(1 - 2\mu)}$	$\mu$

По граням металлического лотка задано жесткое закрепление (Fixed support). С шагом 100 Па к трубе приложены касательные напряжения (Loads–pressure–components–«x» axis), Количество шагов (Number of step) примем равным 10. Нагрузки приложены по оси «x» для построения диаграммы  $u=f(\tau)$ ,  $-1000 < \tau < 0$ . Необходимо иметь в виду, что при линейной постановке задачи ANSYS позволяет моделировать только упругую зону деформаций,  $\tau < \tau_{пр}$ . Граничные условия и нагрузки, действующие на модель, показаны на рис. 3.

Задать контакты между трубопроводом и грунтом можно следующим образом:

- Bonded – целевая и контактная поверхности сцепляются по всем направлениям;
- No separation – целевая и контактная поверхности сцепляются, но проскальзывание разрешено;
- Frictionless – контакт без трения;
- Frictional – контакт с трением, нелинейный контакт; Rough – «грубый» фрикционный контакт с отсутствием скольжения.

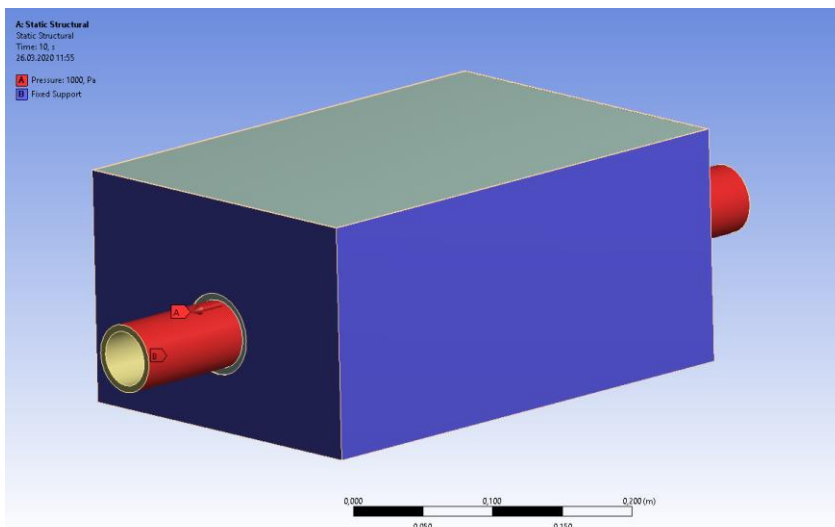


Рис. 3. Граничные условия и нагрузки, действующие на модель  
 Fig. 3. Boundary conditions and loads

Поскольку грунт модели Мора–Кулона не подчиняется линейному закону, а имеет упругую и пластичные зоны, то при решении нелинейных задач в ANSYS необходимо выставить определенные настройки: Static structural – nonlinear control – Newton–Raphson option, и далее в зависимости от геометрии необходимо выбрать метод. При решении данной задачи был выбран несимметричный метод решения задач.

Геометрическая интерпретация метода Ньютона–Рафсона состоит в следующем: задаётся начальное приближение вблизи предположительного корня, после чего строится касательная к графику исследуемой функции в точке приближения, для которой находится пересечение с осью абсцисс. Эта точка берётся в качестве следующего приближения. И так далее, пока не будет достигнута необходимая точность [18].

При моделировании объектов несложной геометрии выбрана опция автоматического задания сетки.

Поскольку исследуются относительно малые перемещения трубопровода, то можно сказать, что грунт неразрывно связан с трубопроводом (bonded – склеен), а продольные перемещения происходят между слоями грунта. Обращаем внимание, что контакт «bonded» справедлив только при изучении малых деформаций между трубопроводом и грунтом, в других случаях необходимо использовать контакт Frictional, который требует задания более детальных функций расчета контактов. Между металлическим лотком и грунтом задан контакт «bonded».

Характеристика грунтов, условия моделирования, геометрия модели полностью повторяют лабораторный стенд и условия проведения экспериментальных исследований, проведенных в работе [19]. На суще-

ствующем лабораторном стенде имеется возможность измерять характер деформаций при продольных и поперечных перемещениях трубы, а также при перемещении трубы вдоль оси (кручении).

#### Результаты моделирования

Моделирование трубопровода в многолетнемерзлом грунте позволяет уменьшить размеры физических лабораторных прототипов и количество полевых испытаний. Исследуемые характеристики грунта позволяют прогнозировать не только продольные перемещения трубопровода, но и трубопроводы по всем трем осям.

На рис. 4 показано перемещение слоев грунта и трубопроводов при приложении продольной нагрузки. Перемещение практически не затрагивает слои грунта возле стенок лотка. Максимальные перемещения, что логично, затрагивают слои по периметру трубопровода. Перемещения слоев грунта дальше, чем  $h=1,5D_n$ , от трубопровода незначительны и меньше максимальных в 9–10 раз.

На рис. 5 представлен график зависимости перемещений от приложенных касательных напряжений. Синяя линия – зависимость, полученная в результате экспериментальных исследований при тех же характеристиках грунта, при которых проводилось моделирование. Учитывая неоднородность грунта, проведено моделирование при значениях модуля Юнга  $E=1 \cdot 10^6$  Па и  $E=2 \cdot 10^6$  Па.

При моделировании мерзлого грунта, программный комплекс ANSYS позволяет изменять его характеристики в зависимости от температуры (5):

$$E, \mu, \rho, \varphi, c = f(t_p). \quad (5)$$

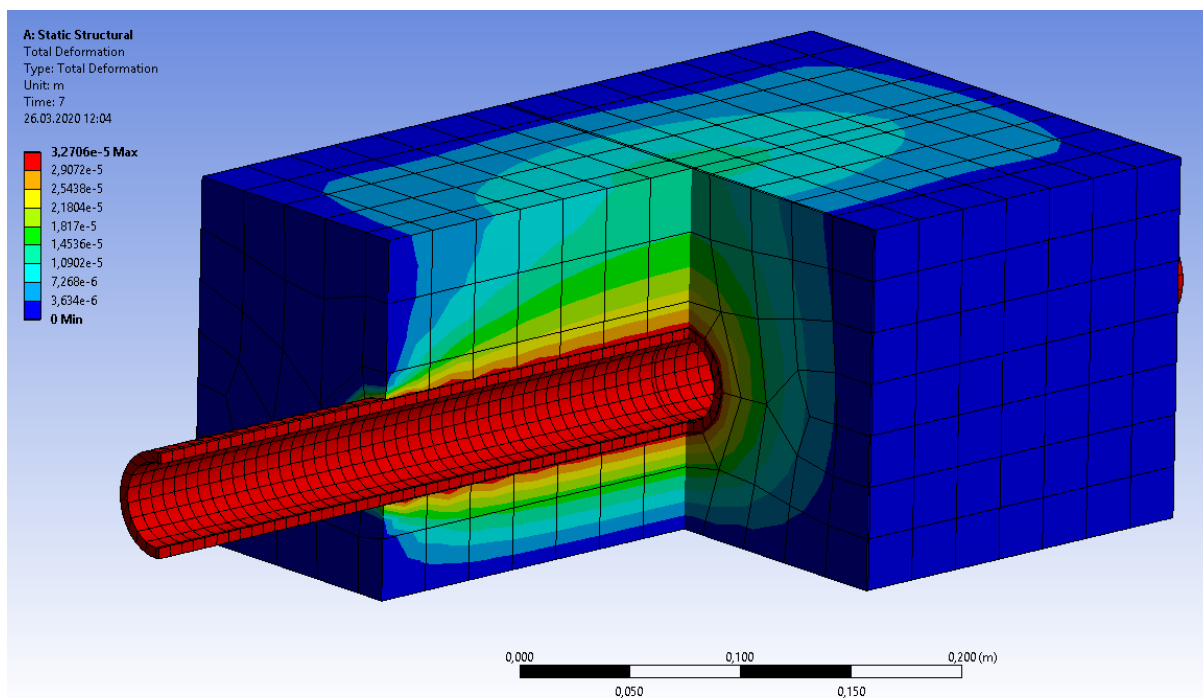


Рис. 4. Результаты моделирования продольных перемещений в разрезе

Fig. 4. Results of modeling longitudinal displacements in the section

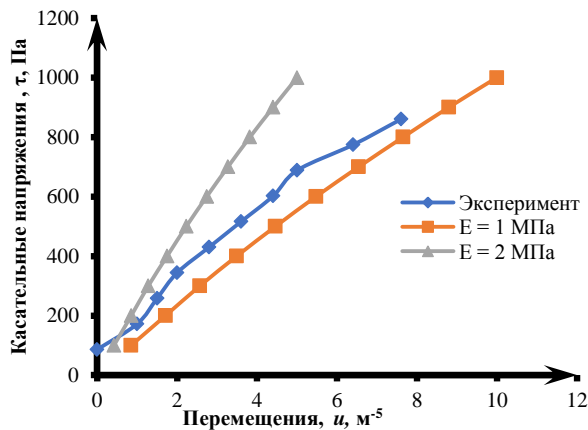


Рис. 5. Сравнение моделирования с экспериментальными исследованиями

Fig. 5. Comparison of modeling with experimental studies

На сегодняшний день проведены экспериментальные исследования по изучению влияния температуры на модуль упругости различных грунтов. Так, например, песок при температуре 0 – имеет модуль Юнга  $E=0,2 \cdot 10^6$  Па, а при температуре минус 4 – модуль Юнга линейно увеличивается до значения  $E=8,0 \cdot 10^6$  Па. Меньше от температуры зависит глина. При изменении температуры от 0 до минус 10 – модуль Юнга изменяется всего в 2 раза – от  $5 \cdot 10^6$  до  $10 \cdot 10^6$  Па. Однако в зависимости от плотности, влажности, структуры, пористости и многих других характеристик модуль Юнга может принимать различные значения для одних и тех же типов грунтов. Поэтому при проектировании трубопровода необходимо проводить экспериментальные исследования всех типов грунтов на интересующем нас участке.

Смоделируем участок конечного наземного трубопровода в насыпи. В качестве грунта засыпки будем использовать песок (рис. 6). Угол внутреннего трения для оттаявшего грунта примем  $\varphi=30$  град, для мерзлого  $\varphi=45$  град. Сцепление оттаявшего грунта  $c=2 \cdot 10^3$  Па, сцепление мерзлого грунта  $c=16 \cdot 10^6$  Па, плотность песка  $\rho=1900$  кг/м<sup>3</sup>. Предположим среднюю глубину заложения трубопровода  $h_{cp}=1,5$  м,

диаметр трубопровода  $D=0,530$  м, толщина стенки  $\delta=0,015$  м. Длина трубопровода  $l=30$  м.  $E=0,2 \cdot 10^6$  Па ( $t=0$  °С),  $E=8 \cdot 10^6$  Па ( $t=-4$  °С) (согласно рис. 6).

Тогда для оттаявшего грунта:

$$\sigma = 1900 \cdot 9,81 \cdot 1,5 = 28 \cdot 10^3 \text{ Па};$$

$$\tau_{np} = 28000 \cdot \tan 30 + 2000 = 18166 \text{ Па}.$$

Для мерзлого грунта:

$$\sigma = 1900 \cdot 9,81 \cdot 1,5 = 28 \cdot 10^3 \text{ Па};$$

$$\tau_{np} = 28000 \cdot \tan 45 + 16000 = 44000 \text{ Па}.$$

Рассмотрим упругую зону взаимодействия трубопровода с грунтом и сравним продольные перемещения трубопровода при оттаивании грунта с  $t=-4$  до  $t=0$  °С при приложенной нагрузке  $\tau=18 \cdot 10^3$  Па. При продольных усилиях более  $18 \cdot 10^3$  Па, исходя из приведенных выше расчетов, грунт переходит в пластичную зону, то есть будет деформироваться без приложения дополнительных нагрузок. Результаты моделирования перемещений трубопровода при оттаивании представлены в табл. 3, а на рис. 6 видно подробное перемещение слоев грунта относительно друг друга при приложении продольных касательных напряжений.

Таблица 3. Численные результаты моделирования продольных перемещений трубопровода 530×15 в насыпи при оттаивании грунта

Table 3. Numerical results of modeling the longitudinal movements of the pipeline 530×15 in the embankment during soil thawing

Приложенные касательные напряжения Applied shear stresses, $\tau$ , Па	Деформации мерзлого грунта Deformations of frozen ground, $u$ , м	Деформации оттаявшего грунта Deformations of thawed soil, $u$ , м
2000	$4,5072 \cdot 10^{-4}$	$1,7447 \cdot 10^{-2}$
4000	$9,0145 \cdot 10^{-4}$	$3,536 \cdot 10^{-2}$
6000	$1,3522 \cdot 10^{-3}$	$5,8633 \cdot 10^{-2}$
8000	$1,803 \cdot 10^{-3}$	$8,8802 \cdot 10^{-2}$
10000	$2,2528 \cdot 10^{-3}$	0,12621
12000	$2,7102 \cdot 10^{-3}$	0,17066
14000	$3,1853 \cdot 10^{-3}$	0,22256
16000	$3,6893 \cdot 10^{-3}$	0,28188
18000	$4,2478 \cdot 10^{-3}$	0,34896

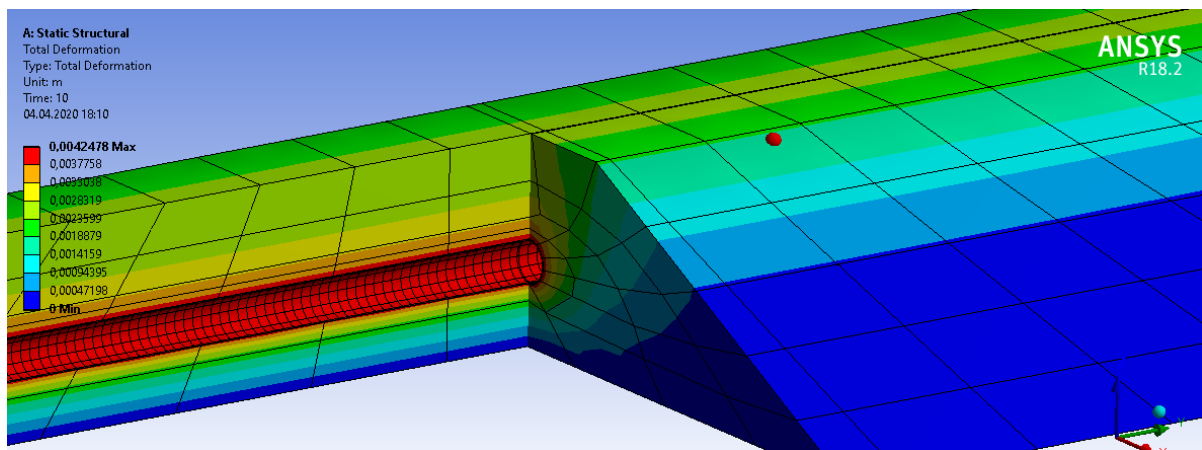


Рис. 6. Результаты моделирования продольных перемещений трубопровода 530×15 в насыпи при оттаивании грунта  
 Fig. 6. Results of modeling the longitudinal movements of the pipeline 530×15 in the embankment during soil thawing

Как видно из табл. 3, при приложении продольных касательных напряжений  $\tau=18 \cdot 10^3$  Па при изменении температуры грунта  $t=-4$  до  $t=0$  °С, продольные перемещения изменяются в 82 раза для заданных условий, что очень значительно при строительстве и эксплуатации трубопроводов.

Сделаем промежуточный вывод по расчету: если прямолинейный трубопровод уложен в траншею с различными характеристиками грунта, то при возникновении в трубопроводе разницы температур и внутреннего давления трубопровод начнет перемещаться. Зная характеристики грунта и стали по длине трубопровода и длины участков с разными характеристиками грунта, мы можем сказать, в какую сторону будет перемещаться трубопровод. При этом вычисляется его абсолютное значение. Перемещаться трубопровод будет в ту сторону, где сопротивление участка трубопровода будет меньше. Сопротивление перемещениям, в свою очередь, зависит от рассмотренных выше характеристик.

В итоге мы получаем задачу о балке, защемленной с двух сторон, с распределенной продольной линейной нагрузкой. Характер защемления и потери устойчивости трубопровода при изменении температуры грунта изучены в работах [19, 20].

Поскольку имеется возможность измерить абсолютное значение перемещений трубопровода и коэффициент постели, мы можем решить и обратную задачу: зная абсолютное перемещение трубопровода, вычисляем ориентировочное значение напряжений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройство для определения плано-высотного положения подземных трубопроводов: пат. Рос. Федерация № 2713998; заявл. 26.10.2018; опубл. 11.02.2020, Бюл. № 5 – 8 с.
2. Устройство для определения плано-высотного положения подземных трубопроводов: пат. Рос. Федерация № 2647215; заявл. 08.08.2016; опубл. 13.02.2020, Бюл. № 8 – 8 с.
3. 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. – 2019. – V. 157. – P. 171–186.
4. Моделирование напряженно-деформированного состояния подземного трубопровода при сдвигах горных пород в зонах активных тектонических разломов / Д.В. Ялалов, А.Р. Валеев, Р.М. Аскарлов, Т.С. Хакимов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 119. – № 3. – С. 102–112.
5. Гишкелюк И.А., Станиловская Ю.В., Евланов Д.В. Прогнозирование оттаивания многолетнемерзлых грунтов вокруг подземного трубопровода большой протяженности // Наука и технологии трубопроводного транспорта и нефтепродуктов. – 2015. – Т. 17. – № 1. – С. 20–25.
6. Гишкелюк И.А., Станиловская Ю.В. Компьютерное 3D моделирование ореола оттаивания грунтов с повторно-жильными льдами вокруг нефтепровода // Трубопроводный транспорт [теория и практика]. – 2013. – Т. 40. – № 6. – С. 14–21.
7. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application / S. Nishimura, A. Gens, S. Olivella, R.J. Jardine // Geotechnique. – 2009. – V. 59. – № 3. – P. 159–171.
8. Оценка влияния радиуса изгиба при расчетах продольных напряжений длительно эксплуатируемых трубопроводов / Р.М. Аскарлов, А.К. Гумеров, Р.М. Каримов, Х.Ш. Шамилов // Наука и технологии трубопроводного транспорта и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 234–242.

Поскольку в ММГ механические свойства грунтов сильно зависят от температуры, то помимо абсолютных перемещений необходимо знать температуру и влажность каждого грунта, которым сложено рассматриваемое поперечное сечение.

#### Заключение

В статье были рассмотрены вопросы моделирования системы трубопровод–грунт методом конечных элементов, а именно:

- 1) теоретические модели грунта и модели взаимодействия трубопровода с грунтом;
- 2) механические характеристики грунта для моделирования грунта в ANSYS;
- 3) сравнение результатов экспериментальных исследований с результатами, полученными на компьютерной модели. Получены адекватные результаты, результаты экспериментальных исследований лежат в пределах результатов моделирования;
- 4) расчет модели трубопровода в насыпи при оттаивании грунта с  $t=-4$  до  $t=0$  °С. Показано, насколько изменятся продольные перемещения при одинаковых касательных напряжениях.
- 5) методика определения направления продольного перемещения трубопровода при известных характеристиках грунта.

*Исследования выполнены в рамках конкурса «РОСНАНО/Конкурс молодежных проектов по инновационному развитию бизнеса «ТЕХНОКРАТ-2018».*

9. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния подземного трубопровода при сдвигах горных пород в зонах активных тектонических разломов / Д.В. Ялалов, А.Р. Валеев, Р.М. Аскарлов, Ю.Д. Пережогин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 125. – № 3. – С. 39–49.
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. – 2019. – V.157. – P. 171–186.
11. Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground / Z. Wen, Y. Sheng, H. Jin, S. Li, G. Li, Y. Niu // Cold regions science and Technology. – 2010. – V. 64. – P. 248–255.
12. Бородавкин П. П. Подземные трубопроводы. – М.: Недра, 1973. – 304 с.
13. Экспериментальные исследования сопротивления мерзлого грунта продольным перемещениям трубопровода при изменении температуры и влажности / Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов, Т.С. Султанмагомедов, Д.А. Гулин, А.Р. Урманова // Наука и технологии трубопроводного транспорта и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 243–251.
14. Lelovic S., Vasovic D. Determination of Mohr–Coulomb parameters for modelling of concrete // Crystals. – 2020. – V. 808. – P. 1–16. DOI: 10.3390/cryst10090808
15. Robert D.J. A modified Mohr–Coulomb model to simulate the behavior of pipelines in unsaturated soils // Computers and Geotechnics. – 2017. – V. 91. – P. 146–160. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.07.004
16. Hackston A., Rutter E. The Mohr–Coulomb criterion for intact rock strength and friction – a re-evaluation and consideration of failure under polyaxial stresses // Solid Earth. – 2016. – V. 7. – P. 493–508. DOI: 10.5194/se-7-493-2016
17. Ashghabadi M.S., Cheng X. Analysis of undrained seismic behavior of shallow tunnels in soft clay using nonlinear kinematic hardening model // Applied sciences. – 2020. – V. 10. – P. 2834–2856. Doi: 10.3390/app10082834

18. Максимов Ю.А., Филипповская А.Е. Алгоритмы решения задач нелинейного программирования. – М.: МИФИ, 1982. – 52 с.
19. Демченко В.Г., Загороднев А.В. Роль температурного перепада при механическом расчете магистральных трубопроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – Т. 62. – № 4. – С. 12–18.
20. Димов Л.А., Димов И.Л. Общая устойчивость подземных МГ в продольном направлении: методы определения и расчета // Газовая промышленность. – 2015. – Т. 719. – № 3. – С. 40–44.

*Поступила 10.03.2021 г.*

#### **Информация об авторах**

**Султанмагомедов Т.С.**, аспирант, ассистент кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Бахтизин Р.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор, первый проректор Уфимского Государственного нефтяного технического университета, академик РАЕН, академик АН Республики Башкортостан, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Султанмагомедов С.М.**, доктор технических наук, профессор кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, декан факультета трубопроводного транспорта, академик РАЕН, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Урманова А.Р.**, студент кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет.



UDC 622.692.4.053

## SIMULATION OF PIPELINE AXIAL DISPLACEMENT IN FROZEN SOILS

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

Ramil N. Bakhtizin<sup>1</sup>,  
rektor@rusoil.net

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov<sup>1</sup>,  
fft2010@mail.ru

Adelia R. Urmanova<sup>1</sup>,  
adeliyaurmanova424@gmail.com

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**The research** of the reseach is caused by the need for numerous experimental studies to determine the effect of temperature and soil moisture on its mechanical characteristics. With a change in temperature and soil moisture, the Poisson's ratio, Young's modulus, cohesion, and friction angle of the soil change. For permafrost soils, these changes are significant. They affect the stress-strain state of the underground pipeline as well as the dependence of the longitudinal displacements on the applied loads. The computer model will reduce the number of experimental research using finite element modeling.

**The aim** of the research is to develop a mathematical model of the pipeline-soil system to study the effect of changes in the temperature of permafrost on the stress-strain state of the pipeline.

**Objects:** underground pipelines laid in permafrost soils, subject to movements during oil and gas transportation; simultaneous influence of soil characteristics on displacement of a pipeline subjected to loads.

**Methods:** mathematical modeling, finite element modeling in the ANSYS software package, methods of building and soil mechanics, experiment planning.

**Results.** The authors have carried out the analysis of the pipeline soil interaction models. A 3D model of the pipeline experimental installation in a tray with a soil array was developed. The paper describes the characteristics of geomechanical theory model of the Mohr-Coulomb plasticity for the soil. The dependence of the longitudinal displacements on the applied longitudinal load in ANSYS is obtained. A comparison is made with the results obtained in the experimental installation.

**Key words:**

Permafrost soil, longitudinal displacements, monitoring, finite element method, stress-strain state.

The research was conducted as part of the RUSNANO/Competition of youth projects on innovative business development TECHNOKRAT-2018 competition.

**REFERENCES**

- Kislun A.A., Shabrov P.N., Tvardievich S.V., Kolesnichenko S.I., Shatokhin A.A., Tkachenko I.G., Shabrov S.N., Shablya S.G. *Ustroystvo dlya opredeleniya planovo-vysotnogo polozheniya podzemnykh truboprovodov* [A device for determining the planned height position of underground pipelines]. Patent RF, no. 2713998, 2020.
- Kiselev Y.V., Kislun A.A., Nosach G.N., Bachalov S.V., Shatokhin A.A., Tkachenko I.G., Geraskin V.G., Shabrov S.N., Shablya S.G., Shumsky B.G., Shabrov P.N., Tvardievich S.V. *Ustroystvo dlya opredeleniya planovo-vysotnogo polozheniya podzemnykh truboprovodov* [A device for determining the planned height position of underground pipelines]. Patent RF, no. 2647215, 2020.
- 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*, 2019, vol. 157, pp. 171–186.
- Yalalov D.V., Valeev A.R., Askarov R.M., Khakimov T.A. Development of vibration-proof metamaterials modeling of the stress-strain state of the underground pipeline during rock shifting in the zones of active tectonic faults. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2019, Iss. 3 (119), pp. 102–112. DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-3-102-112. In Rus.
- Gishkeluk I.A., Stanilovskaya Yu.V., Evlanov D.V. Forecasting of permafrost thawing around an underground cross-country pipeline. *Oil & oil products pipeline transportation: science & technologies*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 20–25. In Rus.
- Gishkeluk I.A., Stanilovskaya Yu.V., Computer 3D modeling of a thawing ground of a thawing ground with re-ice ice around an oil pipeline. *Pipeline transport [theory and practice]*, 2013, vol. 40, no. 6, pp. 14–21. In Rus.
- Nishimura S., Gens A., Olivella S., Jardine R.J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Geotechnique*, 2009, vol. 59, no. 3, pp. 159–171.
- Askarov R.M., Gumerov A.K., Karimov R.M., Shamilo Kh.Sh. Influence of bending radius on longitudinal stresses in long operation pipelines. *Science and technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 234–242. In Rus.
- Yalalov D.V., Valeev A.R., Askarov R.M., Perezhogin Yu.D. Experimental research of the stress-strain state of the underground pipeline during rock shifting in the areas of active tectonic faults. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2020, Iss. 3 (125), pp. 39–49. In Rus. DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-2-39-49.
- 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*, 2019, vol. 157, pp. 171–186.
- Wen Z., Sheng Y., Jin H., Li S., Li G., Niu Y. Thermal elastoplastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground. *Cold regions science and Technology*, 2010, vol. 64, pp. 248–255.

12. Borodavkin P.P. *Podzemnye truboprovody* [Underground pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 304 p.
13. 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. *Science and technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 243–251. In Rus.
14. Lelovic S., Vasovic D. Determination of Mohr–Coulomb parameters for modelling of concrete. *Crystals*, 2020, vol. 808, pp. 1–16. DOI: 10.3390/cryst10090808.
15. Robert D.J. A modified Mohr–Coulomb model to simulate the behavior of pipelines in unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*, 2017, vol. 91, pp. 146–160. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.07.004
16. Hackston A., Rutter E. The Mohr–Coulomb criterion for intact rock strength and friction – a re-evaluation and consideration of failure under polyaxial stresses. *Solid Earth*, 2016, vol. 7, pp. 493–508. DOI: 10.5194/se-7-493-2016.
17. Asheghabadi M.S., Cheng X. Analysis of undrained seismic behavior of shallow tunnels in soft clay using nonlinear kinematic hardening model. *Applied sciences*, 2020, vol. 10, pp. 2834–2856. doi:10.3390/app10082834.
18. Maksimov Yu.A., Fillipovskaya A.E. *Algoritmy resheniya zadach nelineynogo programmirovaniya* [Algorithms for solving nonlinear programming problems]. Moscow, MIPI Publ., 1982. 52 p.
19. Demchenko V.G., Zagorodnev A.V., The role of temperature difference in mechanical calculation of main pipelines. *Pipeline transport: theory and practice*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 12–18. In Rus.
20. Dimov L.A., Dimov I.L. General stability of underground TG in the longitudinal direction: methods of determination and calculation. *Gas industry*, 2015, vol. 719, no. 3, pp. 40–44. In Rus.

Received: 10 March 2021.

#### Information about the authors

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

**Ramil N. Bakhtizin**, Dr. Sc., professor, Academician of the RANS, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, first vice-rector, Ufa State Petroleum Technological University.

**Sultanmagomed M. Sultanmagomedov**, Dr. Sc., professor, Academician of the RANS, dean of the pipeline transport department, Ufa State Petroleum Technological University.

**Adelia R. Urmanova**, student, Ufa State Petroleum Technological University.