

А.В. Ежкова

*Газпром инвест Томск, Томск, Россия
E-mail: alyona7@inbox.ru*

Напряженно-деформированное состояние системы «магистральный трубопровод – грунт» на закарстованных участках (на примере участка магистрального газопровода «Сила Сибири», «Чаянда - Ленск»)

Аннотация. В настоящее время к современным газотранспортным системам предъявляются все более высокие требования с точки зрения надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности. Трассы газопроводов размещены в малоосвоенных регионах, где отсутствуют многолетние наблюдения за опасными природными процессами. В настоящее время карст является наиболее скрыто протекающим и трудно прогнозируемым опасным инженерно-геологическим процессом. При проявлении карстового процесса по трассе трубопровода возможно воздействие дополнительной нагрузки. В связи с этим анализ напряженно-деформированного состояния системы «магистральный газопровод – грунт» является важнейшей задачей для определения количественных характеристик напряжений, способных вызвать развитие аварийной ситуации. В статье рассматривается участок, построенного в настоящее время, магистрального газопровода «Сила Сибири», «Чаянда - Ленск». В пределах рассматриваемой территории широко распространены карбонатные формации кембрийского возраста, имеются проявления поверхностных и подземных форм карста. В связи с этим возможна активизация процесса на этапе эксплуатации, в то время как при проектировании данные инженерно-геологические особенности могли не вызывать опасений. В данной работе проведен анализ напряженно-деформированного состояния при совместном деформировании трубопровода и грунта под воздействием возможной нагрузки – карстового провала. Даны предложения по использованию полученных результатов на этапе эксплуатации.

Ключевые слова: магистральные газопроводы, карстоопасность, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, непроектная нагрузка.

DOI: doi.org/10.32523/2616-7263-2023-144-3-80-88

1. Введение

Проблема повышения надежности и безопасности трубопроводного транспорта является одной из ключевых в газовой промышленности. Важным ее аспектом является эксплуатация газопроводов в сложных инженерно-геологических условиях, в частности, размещение газопроводов на закарстованных территориях. Немаловажен тот факт, что проектирование, строительство и эксплуатация трубопроводных систем ведется в малоосвоенных регионах, вне застроенных территорий, где регулярные наблюдения за опасными природными процессами охватывают непродолжительный период или вовсе отсутствуют, таким образом, расчеты параметров сооружений могут быть выполнены, исходя из необъективных данных [1].

Дополнительная нагрузка, возникающая при раскрытии карстовой воронки, является особой, т.е. такие условия эксплуатации трубопровода считаются нестандартными. На текущий момент проблема расчета трубопроводов на прочность и устойчивость в нестандартных условиях работы достаточно хорошо освещена. В то же время количество публикаций, посвященных взаимодействию магистральных трубопроводов с «карстопроявлениями», достаточно ограничено. Так, Готман Н.З. [2] описывает результаты экспериментальных исследований поведения свайных фундаментов опор трубопроводов, проложенных на закарстованных территориях. П. П. Бородавкиным описаны основные схемы воздействия грунтов на заглубленные сооружения, механизмы давления грунта на трубопровод при различных условиях, схемы потери устойчивости при перемещениях и пр. [3].

Наибольший вклад в разрешение проблемы расчета трубопроводов на прочность и устойчивость в сложных инженерно-геологических условиях внесен А. М. Шаммазовым, В.А. Чичеловым, Р.М. Зариповым, Г.Е. Коробковым. Ими разработаны основные алгоритмы анализа напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) трубопроводных систем, расположенных на закарстованных территориях. Данные исследователи отмечают, что при эксплуатации трубопровода, проложенного по закарстованной территории, должна быть проведена расширенная процедура анализа нагрузок и воздействий на трубопровод. Магистральный газопровод в карстовой зоне деформируется совместно с грунтом под действием собственного веса и веса грунта, находящегося на трубе, а также под воздействием температурного перепада и давления газа [4-8].

При проведении прочностного расчета трубопровода с учетом действительных условий его работы во многих случаях нельзя применять линейную теорию строительной механики. Так основные принципы линейной теории строительной механики включают линейную зависимость между напряжениями и деформациями материала трубы (закон Гука), а также между сопротивлением и перемещением связей, расчет по заданному недеформированному состоянию, то есть отождествляются форма и размеры конструкций до и после деформации (принцип малых перемещений), а также неизменность расчетной схемы. По мнению А.Б. Айнбиндера, при расчете трубопровода на прочность необходимо учитывать три вида нелинейностей: физическую, геометрическую и конструктивную [9]. Использование нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями материала и между сопротивлением и перемещением связей составляет сущность так называемой физической нелинейности. Использование деформированной расчетной схемы и нелинейных соотношений между деформациями и перемещениями составляет сущность так называемой геометрической нелинейности. В процессе нагружения трубопровода при его перемещениях ряд связей выключаются из работы, могут создаваться новые связи, изменяться величины и направления нагрузок, что определяет так называемую конструктивную нелинейность [9]. Возникновение карстового провала в процессе эксплуатации можно отнести к конструктивной нелинейности.

Учитывая вышеизложенное, а также возможность проявлений негативного воздействия карстового процесса на магистральный газопровод в процессе эксплуатации необходимо проанализировать параметры предполагаемого воздействия. В качестве объекта исследования в работе будет рассмотрен участок магистрального газопровода «Сила Сибири», «Чаянда -Ленск», расположенного в Ленском районе Республики Саха (Якутия), протяженностью 160 км. В пределах полосы отвода магистрального газопровода широко распространены карстующиеся коренные породы преимущественно кембрия и ордовика, представленные известняком и доломитом. Имеются поверхностные и подземные формы карста. В период строительства и эксплуатации в связи с появлением техногенной нагрузки возможна активизация карстовых процессов. Основными причинами, которые могут вызвать изменение инженерно-геологических условий, являются: изменение теплового режима горных пород, воздействие температуры транспортируемого продукта, вырубка растительности под полосу отвода газопровода, ведение земляных работ.

Таким образом, целью данной работы является количественный анализ напряженно-деформированного состояния магистрального трубопровода, деформирующегося под воздействием непроектной нагрузки – карстового провала.

2. Методы

Для решения задачи определения количественных характеристик воздействия на этапе эксплуатации могут использоваться численные методы. В настоящее время наиболее эффективными для анализа НДС подземных трубопроводов являются численные методы и наиболее универсальный метод конечных элементов. Общие методические подходы по численному моделированию напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов были разработаны и обоснованы В.В. Алешиным, В.Е. Селезневым, основные положения которых включают следующее:

- численный анализ сложного НДС трубопроводов проводится с минимальными упрощениями их конструкции при моделировании;
- при моделировании учитываются все действующие на трубопроводные конструкции номинальные и аварийные нагрузки и имеющиеся данные технической диагностики;
- численный анализ НДС промышленных трубопроводных систем проводится методом конечных элементов (далее – МКЭ) поэтапно, с последовательным использованием балочных, оболочечных и объемных конечно-элементных моделей трубопроводов, с учетом результатов предыдущего этапа для формирования граничных условий на следующем;
- на различных этапах численного анализа используются два способа моделирования взаимодействия подземного трубопровода с окружающим грунтом: полуэмпирические зависимости сопротивления грунта продольным и поперечным смещениям трубопровода (на первом этапе) и моделирование окружающего подземный участок трубопровода грунта как трехмерной сплошной среды (на последующих этапах) [10].

Данные подходы нашли широкое применение в практике трубопроводного транспорта при помощи программного комплекса ANSYS и могут быть использованы для моделирования взаимодействия трубопровода с предполагаемым карстовым провалом расчетного диаметра.

На предварительном этапе работы по трассе газопровода были выделены участки с возможной активизацией процесса на этапе эксплуатации, определены возможные диаметры карстовых провалов расчетным методом Г.М. Троицкого для 23 участков. Полученные результаты варьировались от 0,13 до 1,66 м.

Последовательность анализа НДС участка трубопровода подземной прокладки включает в себя два подэтапа. На первом этапе численного моделирования рассматривается протяженный участок трубопроводной конструкции длиной несколько сотен метров. Трубопровод моделируется балочными конечными элементами типа «PIPE». Окружающий трубопровод грунт моделируется нелинейными пружинами типа «COMBINE39». Силовые характеристики пружин рассчитываются по инженерным методикам с использованием полуэмпирических зависимостей сопротивления грунта продольным и поперечным смещениям трубы. Воздействие провала моделируется изменением силовой характеристики соответствующей пружины [10]. По результатам первого этапа можно выделить наиболее напряженные участки конструкции и получить граничные условия на концах исследуемого участка.

На следующем этапе моделирования наиболее нагруженный участок (определенный по результатам первого этапа) моделируется оболочечными конечными элементами типа «SHELL». Как правило, длина такого участка не превышает 40-60 м. Окружающий трубопровод грунт рассматривается как трехмерная упруго-идеальнопластическая сплошная среда и моделируется объемными конечными элементами типа «SOLID». Карстовый провал моделируется непосредственно в геометрической модели с

характеристиками, полученными на этапе определения предполагаемых деформаций. По результатам расчета на данном этапе должна быть получена исчерпывающая информация об изменении НДС трубопровода под воздействием непроектной нагрузки – карстового провала.

3. Результаты и обсуждение

Таким образом, смоделируем и проанализируем напряженно-деформированное состояние трубопровода на участке с наибольшим расчетным значением диаметра провала 1,66 м.

На первом этапе трубопровод моделировался в балочном приближении, к расчету принимался протяженный участок 252, 5 м. В качестве нагрузок, воздействующих на модель трубопровода, принимались следующие: внутреннее избыточное давление ($P=9,8$ МПа), температурный перепад ($T=22$ °С), вес трубопровода и грунта обратной засыпки, нелинейное сопротивление окружающего грунта смещению трубопровода, ненормативная нагрузка – карстовый провал.

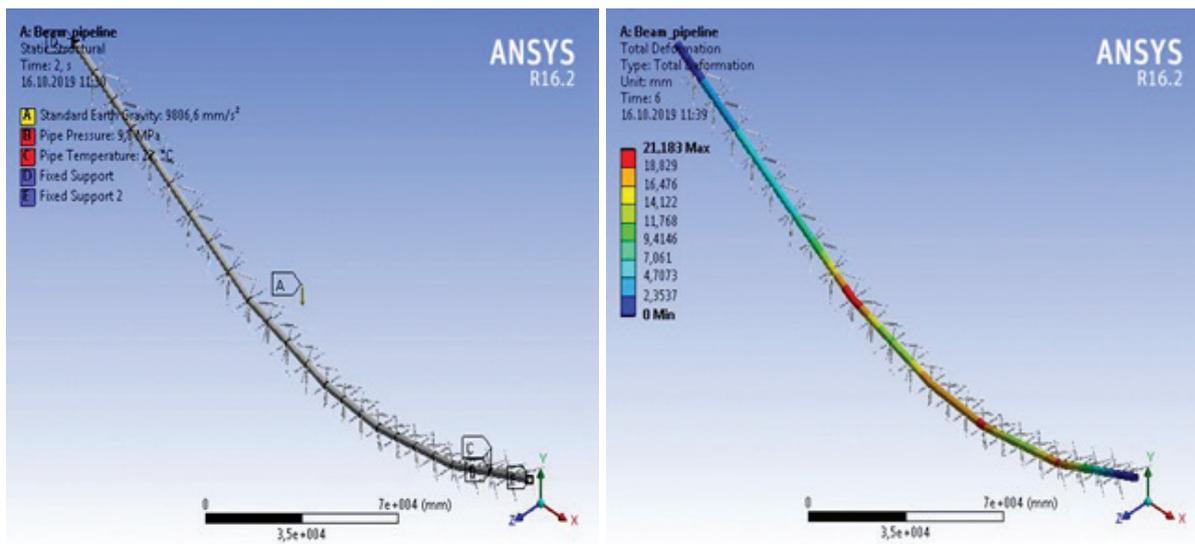
В связи с тем, что необходимо учитывать смещение трубопровода по трем взаимно перпендикулярным направлениям, при моделировании трубопровода в балочном приближении сопротивление прилегающего грунта моделируется нелинейными пружинами, свойства которых задавались в зависимости от свойств грунта (сопротивление грунта продольному смещению трубопровода, сопротивление грунта поперечному перемещению трубопровода в грунте (в вертикальной и горизонтальной плоскости)).

Необходимые исходные данные для моделирования непосредственно трубопровода представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для модели трубопровода [70]

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Габаритные размеры, $D_n \times \delta$, мм	1420 x 25,8
2	Модуль упругости, E , МПа	$2 \cdot 10^5$
3	Плотность, ρ , кг/м ³	7850
4	Коэффициент Пуассона	0,3
5	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_{\text{в}}$, Н/мм ²	590
6	Предел текучести, $\sigma_{\text{т}}$, Н/мм ²	480

Участок трубопровода задавался непосредственно в координатах, учитывающих его пространственное положение в соответствии с проектными решениями. По результатам анализа на первом этапе были определены наиболее напряженные сечения рассматриваемого трубопровода и получены граничные условия (перемещения) для учета в дальнейшем анализе (Рисунок 1).



а) Общий вид балочной модели трубопровода с заданными нагрузками б) Общий вид перемещений узловых элементов модели под воздействием прилагаемых нагрузок.

Рисунок 1. Балочная модель трубопровода

На втором этапе трубопровод моделировался в оболочечном приближении конечными элементами типа «SHELL». Геометрические размеры моделей, свойства и используемые в них типы грунтов задавались мощностям грунтовых массивов в границах рассматриваемого участка. Для задания свойств грунта использовалась модель Друкера–Прагера. Параметры моделей варьировались следующим образом (таблица 2).

Таблица 2. Исходные данные для создания модели грунтов в ANSYS

Параметр	Диапазон значений
Сцепление, C , кПа	$2 \div 136,3$
Угол внутреннего трения, φ , град	$22 \div 38$
Дилатансия, град	0
Модуль упругости, МПа	$20 \div 1000$
Коэффициент Пуассона	$0,2 \div 0,35$
Плотность, кг/м^3	$1800 \div 2510$
Мощность, h , м	$0,4 \div 4,2$

Карстовый провал моделировался непосредственно в соответствии с ранее выполненными расчетами. Нижние и боковые образующие модели расположены на расстоянии 5 диаметров от оси трубопровода с целью исключения влияния граничных условий. При расчете учитывались локальные перемещения, полученные на предыдущем этапе (Рисунок 2).

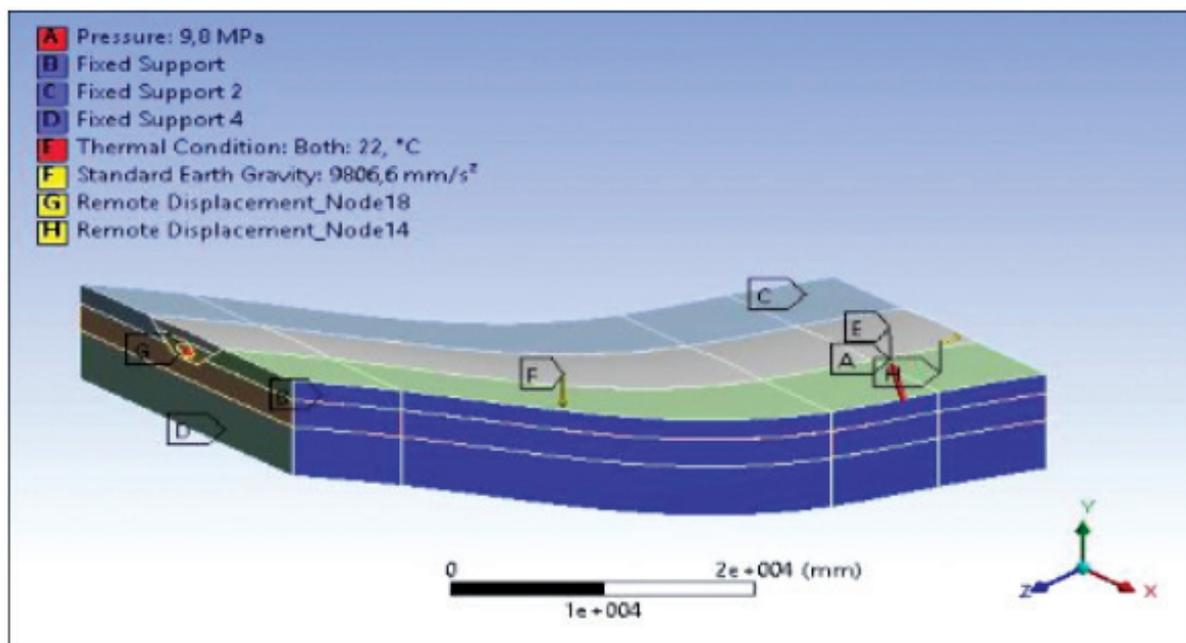


Рисунок 2. Общий вид оболочечной модели трубопровода с нагрузками

Для непосредственной оценки карстоопасности необходимо оценить ее уровень как нагрузки. Ввиду достаточной сложности механизмов, участвующих в процессе разрушения, как правило, в инженерной практике пользуются упрощенными подходами, в частности, критериальными теориями прочности, основанными на трактовке разрушения как порогового явления [11]. В данной работе для математического моделирования пластической деформации трубной стали используется критерий Мизеса об удельной энергии формоизменения [10]. Согласно данному критерию, опасное состояние наступает тогда, когда удельная потенциальная энергия формоизменения достигает своего предельного значения, которое определяется из опытов на простое растяжение-сжатие.

По результатам расчета значение эквивалентного напряжения по Мизесу составило 398,31 МПа, что менее предела текучести ($\sigma_m=480$ МПа), соответственно, выполняется условие прочности.

4. Выводы

Анализ напряженно-деформированного состояния системы «магистральный газопровод – грунтовой массив» при возможном образовании провала показал, что на участке магистрального газопровод «Сила Сибири», Чайнда - Ленск возможное проявление карстового процесса не приведет к развитию каких-либо неблагоприятных последствий, что также подтверждается статистикой аварийности на магистральных газопроводах вследствие карстового процесса.

Однако расчет выполнен в «идеальных» условиях, т.е. на момент начала эксплуатации. При обнаружении «дефектов» в металле трубопровода по данным внутритрубной диагностики в процессе эксплуатации необходимо производить дополнительные проверочные расчеты на опасных участках.

Список литературы

1. Власова Л.В., Ракитина Г.С., Долгов С.И. Влияние природных факторов на устойчивость функционирования Единой системы газоснабжения России. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 184 с.
2. Готман Н.З. О проектировании свайных фундаментов опор трубопроводов в условиях карста//Труды IV международной конференции по проблемам свайного фундаментостроения. Ч.2. – Пермь. – 1994. – С.114-117.
3. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. – М: Недра, 1976. – 280 с.
4. Шаммазов А.М., Зарипов Р.М., Чичелов В.А., Коробков Г.Е. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. – М.:Интер, 2005. – 705 с.
5. Зарипов Р.М., Масалимов Р.Б. Напряженно-деформированное состояние подводного морского нефтепровода с учетом изменения грунтовых условий и параметров эксплуатации // Многофазные системы. 2023. Т. 18, № 1. С. 17–26. DOI: 10.21662/mfs2023.1.003.
6. Зарипов Р.М., Коробков Г.Е., Янчушка А.П. Теоретическое обоснование обеспечения стабильного положения трубопроводов в карстовой зоне//Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2022. № 2 (82), с. 9-15.
7. Assessment of internal pressure effect, causing additional bending of the pipeline/Baktizin, R.N., Zaripov, R.M., Korobkov, G.E., Masalimov, R.B. Journal of Mining Institutethis link is disabled, 2020, 242(2), pp. 160-168
8. Zaripov R. M., Masalimov R. B. USE OF COMPENSATORS IN THE UNDERWATER SECTION OF THE OFFSHORE GAS PIPELINE TO PREVENT ITS SURFACING //OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY GEO ASSETS ENGINEERING. – 2023. – С. 204.
9. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. – М.:Недра, 1991. – 287с.
10. Алешин В.В., Селезнев В.Е., Клишин Г.С., Кобяков В.В., Дикарев К.И. Численный анализ прочности подземных трубопроводов. – М.:Едиториал УРСС, 2013. – 320 с.
11. Селезнев В.Е., Алешин В.В. Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 436 с.

Кепілдендірілген учаскелердегі «магистральдық құбыр - топырақ» жүйесінің кернеулі-деформацияланған жай-күйі («Сібір күші», «Чаянда - Ленск» магистральдық газ құбыры учаскесінің мысалында)

А.В. Ежкова

Газпром инвест Томск, Томск, Ресей

Аңдатпа. Қазіргі уақытта қазіргі заманғы газ тасымалдау жүйелеріне сенімділік, ұзақ мерзімділік, өнеркәсіптік және экологиялық қауіпсіздік тұрғысынан жоғары талаптар қойылуда. Газ құбырларының трассалары қауіпті табиғи процестерді көп жылдық бақылауы жоқ аз игерілген өңірлерде орналасқан. Қазіргі уақытта карст неғұрлым жасырын өтетін және болжануы қиын қауіпті инженерлік-геологиялық процесс болып табылады. Құбыр трассасы бойынша карстық процесс пайда болған кезде қосымша жүктеме әсер етуі мүмкін. Осыған байланысты «магистральдық газ құбыры - топырақ» жүйесінің кернеулі-деформацияланған жай-күйін талдау авариялық жағдайдың дамуын тудыруға қабілетті кернеулердің сандық сипаттамаларын айқындау үшін маңызды міндет болып табылады. Мақалада қазіргі уақытта салынған «Сібір күші», «Чаянда - Ленск» магистральдық газ құбырының учаскесі қаралады. Қаралып отырған аумақтың шегінде кембрий жасындағы карбонатты формациялар кеңінен таралған, карстың жер үсті және жер асты пішіндерінің көріністері бар. Осыған байланысты пайдалану кезеңінде процесті жандандыру мүмкін, ал жобалау кезінде осы инженерлік-геологиялық ерекшеліктер қауіп тудырмауы мүмкін. Бұл жұмыста ықтимал жүктеме - карстық сәтсіздіктің әсерінен құбыр мен топырақты бірлесіп деформациялау кезінде кернеулі-деформацияланған жағдайға талдау жүргізілді. Пайдалану кезеңінде алынған нәтижелерді пайдалану бойынша ұсыныстар берілді.

Түйін сөздер: магистральдық газ құбырлары, карстық қауіптілік, кернеулі-деформацияланған жай-күй, түпкілікті элементтер әдісі, жобаланбаған жүктеме.

Stressed-deformed state of the system «main pipeline – soil» in the karst sections (on the example of the section of the main gas pipeline «Power of Siberia», «Chayanda – Lensk»)

A. Ezhkova

Tomsk Gazprom Invest, Tomsk, Russia

Abstract. Currently, modern gas pipeline systems are increasingly demanding in terms of reliability, durability, industrial and environmental safety. Gas pipeline routes are located in poorly established regions where there are no long-term observations of hazardous natural processes. Currently, karst is the most latently occurring and difficult to predict hazardous engineering and geological process. In case of karst process along the pipeline route, additional load may be applied. In this regard, the analysis of the stress-strain state of the trunk gas pipeline-soil system is the most important task for determining the quantitative characteristics of stresses that can cause the development of emergency. The article considers the section currently built, the main gas pipeline “Power of Siberia,” “Chayanda - Lensk.” Carbonate formations of Cambrian age are widespread within the considered territory, there are manifestations of surface and underground forms of karst. In this regard, it is possible to activate the process during the operation stage, while during the design these geotechnical features may not have caused concerns. In this work, stress-strain analysis was carried out in case of joint deformation of the pipeline and soil under the influence of a possible load - karst dip. Proposals on the use of the obtained results at the operation stage are given.

Ключевые слова: main gas pipelines, karst hazard, stressed-deformed state, finite element method, non-design load.

References

1. Vlasova L.V., Rakitina G.S., Dolgov S.I. Vliyanie prirodnykh faktorov na ustojchivost' funkcionirovaniya Edinoj sistemy gazosnabzheniya Rossii. – M.: Gazprom VNIIGAZ, 2009. – 184 s.
2. Gotman N.Z. O proektirovanii svajnykh fundamentovopor truboprovodov v usloviyah karsta// Trudy IV Mezhdunarodnoj konferencii po problemam svajnogo fundamentostroeniya, CH.2. – Perm'. – 1994. – S.114-117.
3. Borodavkin P.P. Mekhanika gruntov v truboprovodnom stroitel'stve. – M: Nedra, 1976. – 280 s.
4. Shammazov A.M., Zaripov R.M., Chichelov V.A., Korobkov G.E. Raschet i obespechenie prochnosti truboprovodov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyah. – M.:Inter, 2005. – 705 s.
5. Zaripov R.M., Masalimov R.B. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie podvodnogo morskogo nefteprovoda s uchetom izmeneniya gruntovykh uslovij i parametrov ekspluatatsii // Mnogofaznye sistemy. 2023. T. 18, № 1. S. 17–26. DOI: 10.21662/mfs2023.1.003
6. Zaripov R.M., Korobkov G.E., Yanchushka A.P. Teoreticheskoe obosnovanie obespecheniya stabil'nogo polozheniya truboprovodov v karstovoj zone//Truboprovodnyj transport: teoriya i praktika. 2022. № 2 (82), s. 9-15.
7. Assessment of internal pressure effect, causing additional bending of the pipeline/Baktizin, R.N., Zaripov, R.M., Korobkov, G.E., Masalimov, R.B. Journal of Mining Institutethis link is disabled, 2020, 242(2), pp. 160-168
8. Zaripov R. M., Masalimov R. B. USE OF COMPENSATORS IN THE UNDERWATER SECTION OF THE OFFSHORE GAS PIPELINE TO PREVENT ITS SURFACING //OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY GEO ASSETS ENGINEERING. – 2023. – S. 204.
9. Ajnbinder A.B. Raschet magistral'nyh i promyslovyh truboprovodov na prochnost' i ustojchivost'. – M.:Nedra, 1991. – 287s.
10. Aleshin V.V., Seleznev V.E., Klishin G.S., Kobayakov V.V., Dikarev K.I. Chislennyj analiz prochnosti podzemnyh truboprovodov. – M.:Editorial URSS, 2013. – 320 s.
11. Seleznev V.E., Aleshin V.V. Pryalov S.N. Osnovy chislennogo moelirovaniya magistral'nyh truboprovodov. – M.: MAKS Press, 2009. – 436 s.

Сведения об авторе:

А.В. Ежкова – кандидат технических наук, инженер, Газпром инвест Томск, пр. Ленина, 39, Томск, Россия.

А.В. Ежкова – техника ғылымдарының кандидаты, инженер, Газпром инвест Томск, Ленин даң., 39, Томск, Ресей.

A. Ezhkova – Candidate of Technical Sciences, Engineer, Tomsk Gazprom Invest, 39 Lenin Ave., Tomsk, Russia.