

УДК 621.644.2:620.193.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-6-115-125

*П.В. БУРКОВ<sup>1,2</sup>, Д.М. ВОРОНКОВ<sup>2</sup>, С.П. БУРКОВА<sup>2</sup>, В.П. БУРКОВ<sup>2</sup>,**<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,**<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩИХ ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЙ НА СОСТОЯНИЕ УЧАСТКА НЕФТЕГАЗОСБОРНОГО ТРУБОПРОВОДА**

В работе выполнено исследование напряженно-деформированного состояния трубопровода, подверженного речевой коррозии. Моделирование трубопровода и расчет напряженно-деформированного состояния выполнялись с помощью программной системы конечно-элементного анализа. Выбранная программная система конечно-элементного анализа ANSYS позволит выполнять численные эксперименты с достаточной точностью, а полученные результаты будут обладать высокой степенью достоверности. Исходные данные для ряда численных экспериментов взяты из реальных условий эксплуатации трубопровода и интерпретированы в данные для расчета в системе ANSYS.

Численный эксперимент состоит из стадий создания конечно-элементной модели трубопровода, подвергнутого воздействию речевой коррозии, создания сетки конечных элементов на модели трубопровода, приложения действующих на трубопровод нагрузок и задания граничных условий. Ряд численных экспериментов проведен при изменении параметра глубины речевой коррозии. Результатами численных экспериментов являются полученные эпюры, демонстрирующие распределение эквивалентных напряжений (напряжений по Мизесу) по конечно-элементной модели трубопровода. Получены значения максимального и минимального смещения и напряжения по Мизесу. Данная зависимость позволяет определить критическое значение глубины износа от речевой коррозии для рассматриваемого трубопровода. Исследование напряженно-деформированного состояния таких участков является важной и актуальной задачей, решение которой определяет безопасную эксплуатацию данного промышленного трубопровода. Это влияет на его надежность в условиях напряженного состояния, обусловленного давлением среды внутри трубопровода и внешними сжимающими или растягивающими напряжениями. Оценка свойств металла трубопроводов необходима как одна из составляющих превентивных мер по борьбе с аварийными разрушениями.

**Ключевые слова:** трубопровод; речевая коррозия; численный эксперимент; напряженно-деформированное состояние.

**Для цитирования:** Бурков П.В., Воронков Д.М., Буркова С.П., Бурков В.П. Моделирование влияния окружающих осложненных условий на состояние участка нефтегазосборного трубопровода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 6. С. 115–125.

*P.V. BURKOV<sup>1,2</sup>, D.V. VORONKOV<sup>1</sup>, S.P. BURKOVA<sup>2</sup>, V.P. BURKOV<sup>2</sup>,**<sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building,**<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University*

## **MODELING OF PIPELINE STRESS-STRAIN STATE IN COMPLICATED ENVIRONMENT**

**Purpose:** The aim of this work is to study the stress-strain state of the pipeline affected by rill erosion. **Design/methodology/approach:** The pipeline modeling and the stress-strain analysis are carried out using the ANSYS finite element program which provides rather high accu-

racy of numerical experiments, and, as a consequence, achievement of results with high degree of confidence. The initial data for a series of numerical experiments are derived from actual conditions of the pipeline operation and interpreted for using them in the ANSYS program.

**Research findings:** The numerical experiment includes several stages, namely: the development of the finite element model (FEM) of the pipeline affected by rill erosion; meshing process of the pipeline model; load application to the pipeline; and setting the boundary conditions. A series of numerical experiments is carried out in varying the depth of rill erosion resulting in the equivalent stress distribution (von Mises stresses) over the pipeline FEM. The maximum and minimum values of the pipeline strains and von Mises stresses are obtained. This stress distribution allows detecting the critical depth value for the rill erosion in the pipeline under study. A study of the stress-strain state is an important and urgent task, the solution of which determines a safe operation of the field pipeline. The stress-strain state caused by the internal and external pressure or tensile stresses affects the pipeline reliability. Evaluation of the pipeline properties is one of the preventive measures against accidental damage. **Practical implications:** The stress-strain state investigations are very important for ensuring a safe operation of the pipeline of interest. This is because the stress-strain state caused by the internal loads and external compressive or tensile stresses affects the pipeline reliability. **Value:** The estimation of the pipeline material properties assists in prevention of emergency situations.

**Keywords:** pipeline; rill erosion; numerical experiment; stress-strain state.

**For citation:** Burkov P.V., Voronkov D.V., Burkova S.P., Burkov V.P. Modelirovanie vliyaniya okruzhayushchikh oslozhnennykh uslovii na sostoyanie uchastka neftegazosbornogo truboprovoda [Modeling of pipeline stress-strain state in complicated environment]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 6. Pp. 115–125.

## Введение

Больше всего нефти в России добывается на территории Западной Сибири [1], климатические условия которой характеризуются большим перепадом температур, значительным количеством осадков, а также наличием обширных болот. Существенное усложнение составляют части трубопровода, проложенные в сложных климатических условиях.

Система «геологическая среда – подземный трубопровод» претерпевает изменения напряженно-деформированного состояния под влиянием множества факторов. Такие факторы, как геологическая структура пород, рельеф местности, влажность, степень водонасыщения, теплофизические особенности пород, химический состав, температура воздуха, обводненность территории, осадки, характер снегонакопления и снеготаяния, могут воздействовать на систему различным способом. Эксплуатационные характеристики трубопровода также оказывают немаловажное воздействие и, следовательно, его рабочий режим [2]. Для обеспечения надежной и безопасной работы трубопровода в условиях заболоченных или обводненных грунтов применяют балластировку трубопровода.

Встречается влияние чрезмерного изгиба, который сопровождается нестабильным положением системы «грунт – труба – жидкость» (углеводородная среда), проложенной в сложных климатических условиях, и осадкой, что приводит к отказам трубопроводов и авариям. Для того, чтобы предотвращать аварии трубопроводов, происходящие из-за чрезмерных изгибов участков, исследуют воздействие климатических условий, эксплуатационных параметров, воздействие грунтов, а также определяют участки потенциально повышенной

опасности. Наряду с техническими средствами для нахождения этих участков решают задачи прочности и устойчивости, которые применяют для расчетов. Нормативные документы, определяющие порядок расчета, для напорных трубопроводов подземной прокладки указывают на необходимость применения комплексного расчета трубопроводов и массива грунтов. Актуальность развития методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) подземных трубопроводов объясняется тем, что в связи с большой протяженностью увеличение толщины стенки трубопроводов хотя бы на 1 мм является причиной значительного расхода материала, поскольку грунт для трубопровода является не только внешней нагрузкой, но и средой, в которой развиваются деформации линейного сооружения [3]. В то же время в нормативных документах<sup>1</sup> нет указаний по проведению совместного расчета. Элементы трубопроводов во время эксплуатации испытывают воздействие сил от внешних нагрузок, приводящих к возникновению повышенного напряженного состояния материала. В местах переходов дорог, в местах образования промывов и провисаний трубопроводов, переходов через водные преграды, вблизи сочленения трубопроводов с агрегатами перекачивающих станций наиболее интенсивно проявляются изгибные напряжения. Воздействие внешних нагрузок на трубопровод, вызывающих напряжения в материале труб, совместно с внутренним давлением напрямую влияет на состояние материала. Одним из важнейших факторов, влияющих на работу промысловых трубопроводов, является ручейковая коррозия. Ручейковая коррозия, как правило, образуется по верхней или нижней образующей трубы в виде ручейков (желобов) [4]. Известно, что локальные участки трубопроводов с повышенными напряжениями являются предпочтительными для процессов «деградации» функциональных свойств материала за счет деформационного старения и малоциклового усталости металла, которые со временем приводят к критическому состоянию материала и, как следствие, понижению работоспособности труб.

Из вышеприведенных данных следует, что оценка свойств металла трубопроводов необходима как составляющая превентивных мер для борьбы с аварийными ситуациями. Составной частью таких мер также являются усиление напряженных участков трубопровода, механическое снятие и вырезка участков с напряжением путем выпрямления изогнутых элементов трубопровода. Дополнительно требуется изучение влияния эксплуатации трубопровода на образование зон пластичности с учетом особенностей его изготовления и влияния таких зон на надежность в условиях напряженного состояния, с учётом фактических воздействий внешних сжимающих или растягивающих напряжений и давления среды внутри трубопровода. Поэтому исследование напряженно-деформированного состояния участков с данными характеристиками является приоритетной задачей, решение которой определяет долговечность эксплуатации и безопасность использования промыслового трубопровода [5–10].

---

<sup>1</sup> СП 34-116–97. Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промысловых нефтегазопроводов. ГОСТ Р 55990–2014. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования.

Большая часть трубопроводов Западной Сибири и России в целом находится на территории с резко выраженной сезонностью. Данное условие является причиной возникновения негативных процессов, которые в конечном результате приводят к таким явлениям, как выпучивание трубопроводов.

Целью работы является исследование напряженного и деформированного состояния трубопровода, находящегося под действием сил геологической среды и внутреннего давления в осложненных условиях, и определение условий балластировки или применения поплавковых конструкций для участков трубопровода, пролегающих по болоту III типа, при помощи программного обеспечения Ansys и Autodesk Inventor.

### Постановка задачи, методы исследования и эксперимент

Метод конечных элементов определяется как основной метод, применяемый при исследовании напряженно-деформированного состояния, как для систем трубопроводного транспорта, так и для решения других альтернативных задач. Удобной программой считается Ansys из-за повышенной функциональности. Это объясняется тем, что, обладая рядом преимуществ в широком спектре решаемых задач: удобным интерфейсом, приближением к реалистичным условиям, обширным типовым набором конечных элементов, базовых материалов в качестве значений, высокой точностью, – имеет встроенный алгоритм с возможностью внесения изменений с использованием языка программирования, позволяющего автоматизировать отдельные процедуры моделирования разной трудоемкости [11, 12]. На систему «геологическая среда – трубопровод» и соответственно её напряженно-деформированное состояние оказывает воздействие множество сил разного характера. В настоящей работе рассмотрено влияние гравитационных сил, воздействие внутреннего рабочего давления трубопровода и сил сезонного и многолетнего выпучивания грунтов (рис. 1).

На рис. 1 воздействие геологической среды отображено векторами сил  $Q$  по нижним образующим трубопроводных систем. Действие внешних сил, и именно гравитационных, обозначено распределением  $P$ . В трубе диаметром  $d$  имеется рабочее давление  $p$ . Расчет НДС системы «геологическая среда – трубопровод» производился исходя из данных, обычных для подземных трубопроводов Западной Сибири:

наружный диаметр трубы – 426 мм, толщина стенки – 8 мм, длина участка трубопровода – 48 м, плотность воды –  $1000 \text{ кг/м}^3$ , плотность нефти –  $850 \text{ кг/м}^3$ , масса 1 м трубы – 62,14 кг/м, материал трубы – низколегированная сталь 09Г2С, модуль Юнга – 206 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3; предел прочности стали – 502 МПа, предел текучести стали  $\text{Н/мм}^2$  – 353 МПа. Нагрузки: внутреннее давление – 4 МПа, напряжение от воздействия сил геологической среды – 0,8 МПа, выталкивающая сила водной среды – 39004 Н, нагрузка от собственного веса трубопровода – 29231 Н, напряжение, вызываемое силами гравитации, – 0,4 МПа. Напряженно-деформированное состояние любого несущего элемента линейной части нефтепровода однозначно

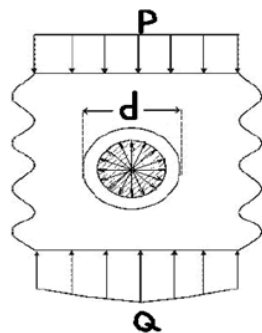


Рис. 1. Модель сечения системы «геологическая среда – трубопровод»

определяется нагрузками, воздействующими на него. На подземные трубопроводы, проложенные в условиях болот, воздействуют постоянная нагрузка выталкивающей силы среды  $q_{\text{выт}}$  и длительная нагрузка от внутреннего давления перекачиваемого продукта, также на трубопровод действует нагрузка от собственного веса участка трубопровода  $q_{\text{тр}}$ , т. к. мы рассматриваем жесткую заделку трубопровода. Данный участок трубопровода проходит по территории с наиболее холодной пятидневкой от  $-46$  до  $-49$  °С, поэтому приняты трубы в северном исполнении.

Математической моделью объекта численного эксперимента на микроуровне в системе ANSYS является система дифференциальных уравнений в частных производных. Данная модель описывает процессы, происходящие в сплошной среде с заданными краевыми условиями. Система уравнений известна, но точное решение ее удается получить лишь для частных случаев. Это является причиной того, что для анализа объектов на микроуровне необходимо сделать переход к приближенной модели, поэтому для конкретизации объекта исследования были сделаны следующие допущения:

- труба без коррозионных дефектов, но с наличием ручейковой коррозии на нижней образующей трубы, глубина распространения коррозии ( $h$ ) составляет 0,5 мм (рис. 2);
- геометрия коррозионного дефекта остается неизменной на всей протяженности трубы;
- края трубопровода жестко зафиксированы;
- нагрузки, создаваемые окружающим грунтом, не учитываются.

Длина коррозии не принималась в расчет, т. к. доказано, что длина коррозионного износа влияет несущественно на повреждение структуры материала трубы, на концентрацию напряжений и на возникающие напряжения [13]. Были созданы их конечно-элементные сеточные модели, заданы условия фиксации и внутреннее давление, равное 4 МПа. Модель трубопровода для проведения численного эксперимента в системе ANSYS представлена на рис. 3.

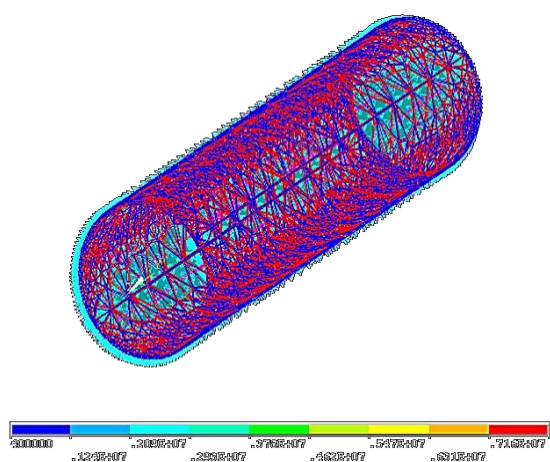


Рис. 2. Нагрузки, применимые к трубопроводу

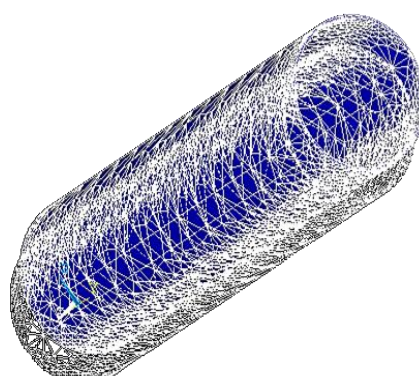


Рис. 3. Деформированная форма модели исходного состояния

Расчет производился с помощью трехмерного моделирования и решения пространственной задачи определения напряженно-деформированного состояния трубопровода в осложненных условиях прокладки на болотах III типа.

На участок оболочки приложены распределенные по площади оболочки нагрузки. Сварные соединения в данной модели не учитывались. Модель конечно-элементная включает в себя пять объектов с оболочкой, связанных контактом типа *bonded*, при котором обеспечивается полная зависимость перемещений во всех узлах. Использована декартова система координат. Наложение конечно-элементной сетки принято свободным, повторяющим кривизну поверхности. Сетка определяется в автоматическом режиме. Минимальный размер грани сетки 0,6 мм получен при сгущении в окрестностях дефекта. В остальных конструктивных элементах размер сетки принят равным 10 мм. Решение произведено методом итераций нелинейной модели. Значения эквивалентных напряжений представлены в максимально загруженной области сечения оболочки.

### Обсуждение результатов исследований

Состояния, при которых внутренние изменения металла приводят к его разрушениям, называются предельными напряженными состояниями. Вывод о надежности конструкций следует производить на основании сопоставления предельных напряжений, которые возникают в наиболее опасных точках, с предельно допустимым значением для данного материала. Предельное допустимое значение конструкции является той гранью, за которой недопустимо эксплуатировать конструкцию. Надежность работы оказывается тем выше, чем дальше от предельного состояния уровень фактических напряжений внутри материала детали. Использование программ ANSYS для проведения расчета напряженно-деформированного состояния стенок трубопроводов позволяет получать выходные результаты в виде трех значений главных напряжений, которые представляют собой корни кубических уравнений, определяемые компонентами векторных напряжений.

Результаты расчета представлены в виде графических изображений полей распределения напряжений и смещений в стенке трубопровода на рис. 4–7.

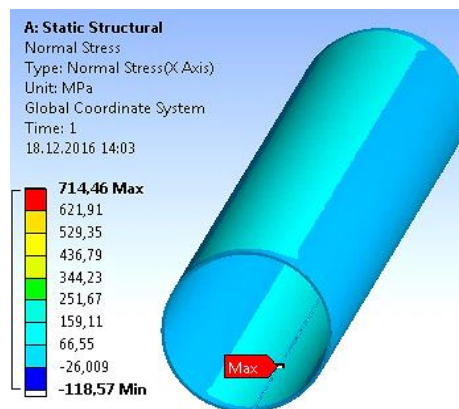


Рис. 4. Напряжения в трубопроводе с речейковой коррозией при внутреннем давлении 4,0 МПа

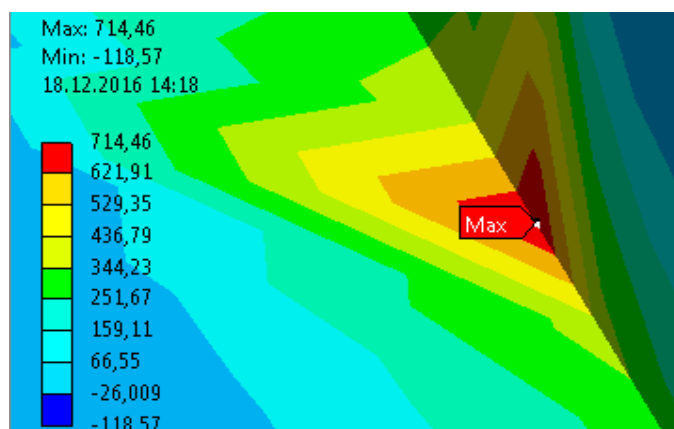


Рис. 5. Локация максимальных напряжений в нижней части трубы с речейковой коррозией

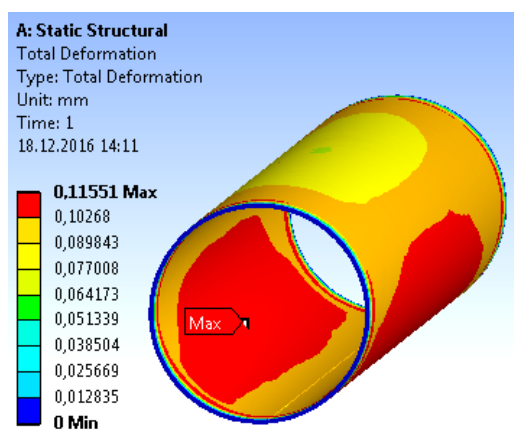


Рис. 6. Деформации в трубопроводе при внутреннем давлении 4,0 МПа

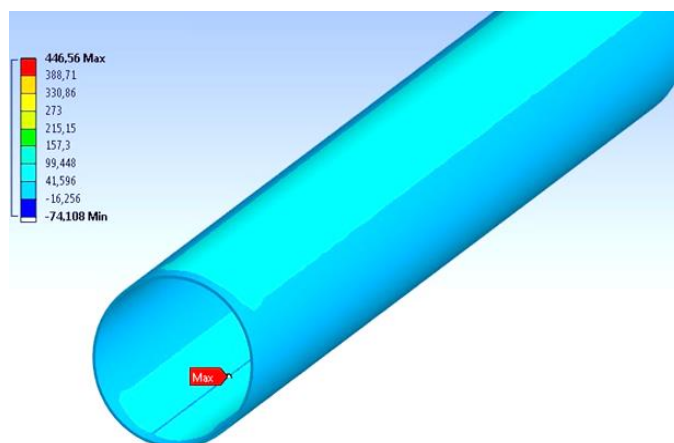


Рис. 7. Напряжения в трубопроводе с речейковой коррозией при внутреннем давлении 2,5 МПа

Расчет напряженно-деформированного состояния секции трубопровода показал, что ANSYS является универсальной системой автоматизированного проектирования и позволяет решать множество сложных задач. Исходя из полученных в ходе расчетов в компьютерном комплексе ANSYS результатов видно, что при рабочем давлении 4,0 МПа нефтегазосборный трубопровод с ручейковой коррозией по нижней образующей испытывает напряжения порядка 700 МПа. Так как марка стали, из которой изготовлен трубопровод, имеет предел прочности 502 МПа, произойдет разрушение стенки трубопровода. Данный сценарий событий повлечет как экологический ущерб для окружающей среды, так и экономический – для эксплуатирующей организации.

Для того чтобы избежать последствий разрыва стенки трубопровода, предлагается понизить рабочее давление в нефтегазосборном трубопроводе до 2,5 МПа до момента проведения работ по его ремонту. Результаты напряженно-деформированного состояния трубопровода с ручейковой коррозией по нижней образующей с внутренним давлением 2,5 МПа представлены на рис. 7.

Как показывают расчеты, влияние воздействий среды эксплуатации имеет большое значение. Вследствие влияния воздействий внешней среды перемещение трубопровода может достигать значительных размеров за короткие сроки эксплуатации. Как показала практика, за 4,5–6 лет работы трубопроводов деформации за счет сил геологической среды могут достигать до одного метра и более при условии, что глубина заложения трубопроводов в среднем на разных участках трассы колеблется от 0,8 до 1 м. При существующих граничных условиях магистральные трубопроводы находятся в состоянии, требующем дорогостоящих диагностических и ремонтных работ. Если проведение работ будет затянuto, эксплуатация магистралей в дальнейшем может вызвать аварии. Расчеты, выполненные в настоящей работе, могут помочь в определении местоположения участков труб, где возможны значительные перемещения трубопроводов за счет воздействия сил геологической среды.

Информация о состоянии линейной части магистральных нефтепроводов позволяет выявлять участки с предаварийной ситуацией (в том числе до обнаружения дефектов) и предпринимать меры для их устранения, тем самым поднимая срок надежности при эксплуатации трубопроводной системы.

По результатам проведенных расчетов были построены графики полученных напряжений и деформаций (рис. 8, 9).

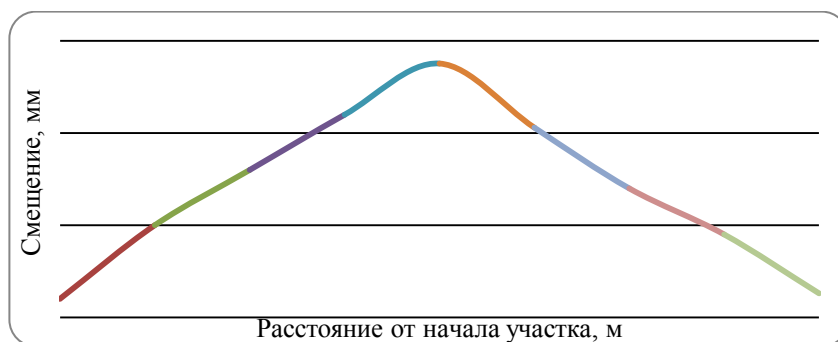


Рис. 8. График распределения деформаций

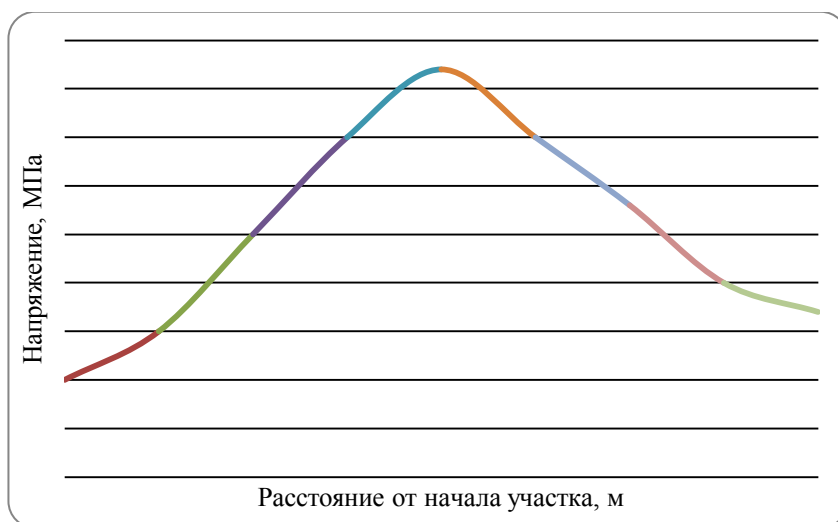


Рис. 9. График распределения напряжений

На рисунках можно видеть, что максимальные деформации наблюдаются в центре участка, где поперечное отклонение от нормали равно 137,8 мм, а максимальное напряжение составляет 42,6 МПа и будет наблюдаться внутри полости трубы.

### Заключение

Таким образом, из результатов расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода с ручейковой коррозией по нижней образующей с внутренним давлением 2,5 МПа следует, что испытываемые напряжения в зоне ручейковой коррозии уменьшились до 450 МПа. Поэтому понижение рабочего внутреннего давления с 4,0 до 2,5 МПа позволит обеспечить безаварийную работу нефтегазосборного трубопровода до проведения работ по его ремонту.

Выполненные расчеты позволили сделать следующие выводы:

1. Установлено, что изменение значений напряжений, возникающих при выпучивании трубопровода, может достигать величин, близких к пределу текучести стали, что снижает уровень надежности трубопровода.
2. Определено, что величина напряжений переменна по длине трубы. Участки трубопровода, прилегающие к участкам плотного грунта, характеризуются повышенным уровнем напряжения.
3. Изменения условий взаимодействия трубы с грунтом усложняют процессы деформации, что вызывает необходимость более детального исследования напряженно-деформированного состояния нефтепровода с учетом различных физико-механических свойств грунта.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Добыча нефтяного сырья*. Основные показатели // Министерство энергетики Российской Федерации [официальный сайт]. Условия доступа: <http://minenergo.gov.ru/> (дата обращения: 18.12.2016).

2. Шевчук В.В., Иваник Е.М., Лавренюк В.И., Лавренюк Н.В. Напряженно-деформированное состояние системы геологическая среда – трубопровод в условиях криолитозоны // Геофизический журнал. 2008. № 1. С. 74–80.
3. Бурков П.В., Буркова С.П. Исследование напряженно-деформированного состояния участка проектируемого нефтесборного трубопровода Угутского месторождения // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 7. Ч. 1. Условия доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56231>
4. Басарыгин Ю.М., Будников В.Ф., Булатов А.И. Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации: в 6 т. Т. 6. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. 399 с.
5. Кузбожжев А.С. Материаловедческие критерии оценки надежности металла, методы прогнозирования ресурса газотранспортных систем // Российская государственная библиотека [официальный сайт]. Условия доступа: <https://dlib.rsl.ru/01004388036>
6. Рило И.П., Желудкова К.А., Клещин Д.А. // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2015. № 4. С. 10–17.
7. Голубин С.И., Баясан Р.М., Лобанов А.Д., Баясан Т.В. Сравнительная оценка эффективности работы двухфазных термосифонов для термостабилизации грунтов в криолитозоне // Инженерные изыскания. 2012. № 8. С. 71–76.
8. Burkov P.V., Burkova S.P., Samigullin V.D. Computer simulation of series-strain state of oil gathering pipeline designed for Ugut field // IOP Conf. Mat. Sci. and Eng. 2016. 125, 012037. 7 p.
9. Antropova N.A., Krets V.G., Luk'yanov V.G., Baranova A.V. Reliability assessment of tunneling flow charts // Series: Earth and Environmental Science, IOP Conference Proceedings. IOP Publishing Ltd, Bristol, 2015. 24. 012019 p.
10. Butov G., Nikulchikov V.K., Nikulchikov A.V., Yashchuk A.A. Study of the stress-strain behavior and strength characteristics of sealer devices for oil-trunk pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 91 (1). № 012052.
11. Burkov P.V., Chernyavsky D.Y., Burkova S.P., Konan A. // Proc. IOP Conf. Bristol: IOP Publishing Ltd, Series: Earth and Environmental Science, 2014. V. 21. P. 1–5.
12. Чугапов М.А. ANSYS для инженеров. М.: Машиностроение-1, 2003. 320 с.
13. Nahal M., et al. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015. V. 40. № 11. P. 3273–3283.

## REFERENCES

1. Dobycha neftyanogo syr'ya. Osnovnye pokazateli [Oil stock production. Main indicators]. Available: <http://minenergo.gov.ru/> (accessed: December 18, 2016). (rus)
2. Shevchuk V.V., Ivanik E.M., Lavrenyuk V.I., Lavrenyuk N.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sistemy geologicheskaya sreda-truboprovod v usloviyakh kriolitozony [Stress-strain state of geological environment-pipeline system in permafrost conditions]. *Geofizicheskii zhurnal*. 2008. No. 1. Pp. 74–80. (rus)
3. Burkov P.V., Burkova S.P. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uchastka proektiruемого нефтесборного трубопровода угутского месторождения [Stress-strain state analysis of oil gathering pipeline in the Ugut field]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2015. No. 7. Available: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56231> (rus)
4. Basarygin Yu.M., Budnikov V.F., Bulatov A.I. Teoriya i praktika preduprezhdeniya oslozhnenii i remonta skvazhin pri ikh stroitel'stve i ekspluatatsii [Theory and practice of preventing wells from failure and repair during construction and operation], in six vol. V. 6. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2004. 399 p. (rus)
5. Kuzbozhev A.S. Materialovedcheskie kriterii otsenki nadezhnosti metalla, metody prognozirovaniya resursa gazotransportnykh sistem [Material science criteria for assessing the metal reliability, methods for predicting resources of gas transportation systems]. Available: <https://dlib.rsl.ru/01004388036> (rus)
6. Rilo I.P., Zheludkova K. A., Kleshchin D. A. Truboprovodnyi transport teoriya i praktika [Pipeline transportation: theory and practice]. 2015. No. 4. Pp. 10–17. (rus)
7. Golubin S.I., Bayasan R.M., Lobanov A.D., Bayasan T.V. Svrnritel'naya otsenka effektivnosti raboty dvukhfaznykh termosifonov dlya termostabilizatsii gruntov v kriolitozone [Comparative assessment of the efficiency of the operation of two-phase thermosiphons for the thermal stabilization of soils in the cryolithozone]

- tive analysis of efficiency of two-phase thermosyphons for soil thermal stabilization in permafrost zone]. *Inzhenernye izyskaniya*. 2012. No. 8. Pp. 71–76. (rus)
8. *Burkov P.V., Burkova S.P., Samigullin V.D.* Computer simulation of stress-strain state of oil gathering pipeline designed for Ugut field. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 125. P. 012037.
  9. *Antropova N.A., Krets V.G., Luk'yanov V.G., Baranova A.V.* Reliability assessment of tunneling flow charts. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bristol: IOP Publishing Ltd., 2015. P. 012019.
  10. *Butov V.G., Nikulchikov V.K., Nikulchikov A.V., Yashchuk A.A.* Study of the stress-strain behavior and strength characteristics of sealer devices for oil-trunk pipelines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. V. 91. No. 1.
  11. *Burkov P.V., Chernyavsky D.Y., Burkova S.P., Konan A.* *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bristol: IOP Publishing Ltd., 2014. V. 21. Pp. 1–5.
  12. *Chigarev M.A.* ANSYS dlya inzhenerov [ANSYS for engineers]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2003. 320 p. (rus)
  13. *Nahal M., et al.* Pipelines reliability analysis under corrosion effect and residual stress. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015. V. 40. No. 11. Pp. 3273–3283.

#### Сведения об авторах

*Бурков Пётр Владимирович*, докт. техн. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovpv@mail.ru

*Воронков Дмитрий Максимович*, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, dmitriy-voronkov-95@mail.ru

*Бурков Владимир Петрович*, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovvp@gmail.com.

*Буркова Светлана Петровна*, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovasp@tpu.ru

#### Authors Details

*Petr V. Burkov*, DSc, Professor, Oil and Gas Engineering Division of School of Earth Sciences & Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., Tomsk, Russia; Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., Tomsk, Russia; burkovpv@mail.ru

*Dmitrii M. Voronkov*, Undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., Tomsk, Russia; dmitriy-voronkov-95@mail.ru

*Vladimir P. Burkov*, Assistant Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., Tomsk, Russia; burkovvp@gmail.com

*Svetlana P. Burkova*, PhD, A/Professor, Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., Tomsk, Russia; burkovasp@tpu.ru