

Санкт-Петербургский государственный университет

НИКУЛИНА Мария Максимовна

Выпускная квалификационная работа

Моделирование длительной прочности магистральных трубопроводов

Уровень образования: магистратура

Направление *01.04.03 «Механика и математическое моделирование»*

Основная образовательная программа *ВМ.5506.2019 «Механика и математическое моделирование»*

Научный руководитель:
проф., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, Ю.В. Петров

Рецензент:
д.ф.-м.н., А.А. Груздков

Санкт-Петербург
2022

Saint Petersburg State University

Mariia Nikulina

Master's Thesis

Modelling of the long-term strength of trunk pipelines

Education level: master

Speciality *01.04.03 "Mechanics and Mathematical Modelling"*

Programme *BM.5506.2019 "Mechanics and Mathematical Modelling"*

Scientific supervisor:
Sc.D, prof. Y.V. Petrov

Reviewer:
Sc.D, A.A. Gruzdkov

Saint Petersburg
2022

Оглавление

Введение	4
Обзор литературы	8
1. Кинетическая модель разрушения с энергетическими начальными условиями	11
1.1. Постановка задачи	11
1.2. Зависимость констант модели разрушения от температуры	14
2. Модель длительной прочности трубопровода при подвижках грунта	17
2.1. Постановка задачи	17
2.2. Вывод функции прогиба	19
3. Результаты расчетов для трубопроводной стали	22
3.1. Численные расчеты для аналитической модели длительной прочности трубопроводов	22
3.2. Результаты, полученные в Ansys	26
Заключение	30
Список литературы	32

Введение

Большинство конструкций, используемых в автомобильной, строительной, авиационной, космической, кораблестроительной, нефтегазовой и других отраслях промышленности, сделаны из металла или его сплавов. Они подвержены различным внешним силовым (вес различных объектов, внешнее давление и др.) и несиловым (температурное воздействие, химическое воздействие внутренних и внешних сред и др.) нагрузкам.

Прежде чем конструировать реальный объект, необходимо провести технические испытания на образцах. Одним из важнейших физических свойств металла является прочность, и отсутствие испытаний на растяжение может повлечь за собой серьезные последствия: свойства используемых материалов не будут учтены при строительстве, что в свою очередь может привести не только к многомиллионным убыткам для компаний, но и к катастрофам, влекущим за собой человеческие жертвы. При обрушении моста Моранди в Генуе 14 августа 2018 года погибли более 40 человек. Одной из причин катастрофы называют недостаточный учет погодных условий эксплуатации при конструировании [19].

Можно выделить несколько типов разрушения по характеру силового воздействия: разрушения, вызванные усталостным нагружением, разрушения, вызванные кратковременным однократным статическим или динамическим нагружением, разрушения, вызванные длительным статическим нагружением. Данная работа посвящена последнему типу разрушений: исследование кинетической модели разрушения на примере магистральных трубопроводов с целью получить данные о долговечности трубопроводов при различных нагрузках.

Магистральными называют трубопроводы диаметром до 1420 мм, которые транспортируют газообразные, жидкие, твердые среды от места их добычи до места переработки и далее до потребителя. Их общая протяженность в Российской Федерации по состоянию на конец 2020 года составляет более 285 000 км [9]. Любое разрушение в трубопроводах приведет к утечке химических продуктов, что повлечет за собой зна-



Рис. 1: Обрушение моста Моранди в Генуе

чительный экономический ущерб и нанесет большой вред экологии. В августе 1994 года произошел крупнейший за последние 30 лет разлив нефти в России: авария на нефтепроводе "Возей - Головные сооружения" АО «Коминнефть» (Усинский район Республики Коми). По разным данным, потеря составила от 100 тыс. до 300 тыс. тонн сырой нефти, причиной разрушения считается коррозионный износ коммуникаций, а также сложная инженерно-геологическая обстановка, обусловленная распространением многолетнемерзлых пород [18]. В январе 2000 года разорвался трубопровод компании Petrobras (Рио-де-Жанейро, Бразилия), в воду вылилось около 8,2 тыс. баррелей нефти. Причиной катастрофы стал разрыв проложенного по дну моря нефтепровода. По одной из версий, авария случилась на участке подводного перехода с размытым дном, что привело к деформации трубы [14].

На рис. 3 представлены последствия испытания по определению кинетических и критических характеристик предельных состояний, образования микро- и макро- дефектов, роста и остановки трещин [4].



Рис. 2: Ликвидация последствий прорыва трубопровода в Республике Коми



Рис. 3: Разрушение газопровода, Газпром, Россия, 2016

Данная работа посвящена изучению зависимости времени разрушения трубопровода от его прогиба, вызванного подвижками грунта.

Цель работы: сопряжение кинетической модели поврежденности с математической моделью изгиба трубопровода при подвижках грунта с целью предсказать его длительную прочность.

Задачи исследования:

- Исследовать зависимость констант кинетической модели поврежденности с энергетическими начальными условиями от температуры;
- Применить кинетическую модель поврежденности к задаче об изгибе трубопровода при подвижках грунта;
- Провести серию численных экспериментов для получения зависимости времени разрушения от прогиба трубы;
- Сравнить полученные результаты с расчетами, выполненными в Ansys.

В первой главе данной работы выводится кинетическая модель разрушения с энергетическими начальными условиями. Показано применение модели на примере жаропрочного сплава на никелевой основе, и исследуются зависимости констант модели от температуры.

Вторая глава посвящена применению кинетической модели разрушения к трубопроводной стали. Выведено дифференциальное уравнение изгиба трубы и получено его аналитическое решение. С его использованием получена модель разрушения трубопроводов при подвижках грунта.

В третьей главе построены зависимости времени разрушения от прогиба трубы, вызванного подвижками грунта. Проведено сравнение этих зависимостей, численно полученных из аналитической модели с зависимостями, полученными с помощью программного комплекса ANSYS.

Обзор литературы

Исследование процессов генерирования и развития повреждений – одна из наиболее актуальных задач в области изучения усталости материалов, поскольку знание кинетики указанных процессов позволяет провести объективную оценку долговечности объектов в заданных условиях эксплуатации [8], [16], [7], [21]. Начиная с 70-х годов XX века появилось множество исследований процесса длительного разрушения материалов и элементов конструкций в условиях ползучести, этому послужила континуальная теория разрушения Качанова-Работнова, предложенная двумя выдающимися советскими учеными Л.М. Качановым и Ю.Н. Работновым. Главной задачей исследований в этой области стоит определение длительной прочности материала, т.е. сопротивления материалов разрушению в условиях ползучести. Под ползучестью будем понимать неупругую деформацию, которая возрастает со временем под действием постоянного напряжения и постоянной температуры. Время до полного разрушения образца при постоянной нагрузке – время разрушения.

В 1958 году Л.М.Качанов предложил применять скалярный параметр сплошности ψ характеризующий изменение площади поперечного сечения образца при его разрушении в условиях ползучести [12]. Для неповрежденного материала $\psi = 1$ в момент времени $t = 0$, а для полностью поврежденного материала $\psi = 0$ в момент времени $t = t_*$, где t_* – время разрушения .

В 1959 году Ю.Н. Работновым были рассмотрены механизмы развития трещины и даны оценки длительной прочности на примере образца с трещиной, перпендикулярной направлению растяжения [17]. Ю.Н. Работновым был введен “параметр поврежденности”

$$\omega = 1 - \psi$$

Этот параметр изменяется от $\omega = 0$ для неповрежденного состояния ($t = 0$) до $\omega = 1$ для полностью поврежденного состояния ($t = t_*$).

Также Работновым было предложено кинетическое уравнение раз-

рушения

$$\frac{d\omega}{dt} = f(P, \omega),$$

где P – приложенная нагрузка.

На основании этих работ и родилась континуальная теория разрушения Качанова-Работнова, которая послужила основой для многих работ, в том числе и для данной.

Разрушение образца, находящегося в условиях ползучести бывает вязким и хрупким. Главным отличием вязкого разрушения от хрупкого является значительная пластическая деформация (образование шейки). Вязкое разрушение носит как правило внутризеренный (транскристаллический) характер, а хрупкое – межзеренный (интеркристаллический) характер. Разрушение первого типа происходит при относительно низких температурах и характеризуется высокой скоростью деформации, а разрушения второго типа наблюдается при высоких температурах и скорость деформации относительно мала. Также встречается смешанный тип разрушения, т.е. в процессе длительного нагружения разрушение переходит от вязкого типа к хрупкому.

В книге Малинина Н.Н. [13] было предложено решение кинетической модели поврежденности типа Качанова-Работнова с нулевыми начальными нулевыми условиями. Если подставить в него граничное условие $\omega|_{t=t_*} = 1$, то получаем время до разрушения

$$t_* = A \left(\frac{P}{\sigma_u} \right)^{-m},$$

где σ_u – предел прочности при растяжении.

В данной модели A и m – константы материала, которые зависят от температуры и от типа разрушения. Тогда для каждого этапа разрушения необходимо подбирать новые значения для констант.

В данной работе применяется модель разрушения, с помощью которой можно описать весь диапазон напряжений, то есть константы материала в модели зависят только от температуры и не зависят от типа разрушения. Системы магистральных трубопроводов могут функционировать при различных условиях, поэтому оценка долговечности тру-

бопровода должна быть произведена с учетом множества факторов. В настоящее время одним из самых актуальных способов моделирования является конечно-элементное моделирование в программных пакетах: ANSYS, COMSOL, ABAQUS и другие.

В. С. Жернаков и И. Н. Будилов [11] моделируют развитие трещины в трубопроводе в зонегиба с учетом температуры внутренних сред. Моделирование производится при помощи программного комплекса ANSYS: местогиба трубопровода строится с помощью трехмерных конечных элементов, а трещина эллиптической формы задается изопараметрическими элементами второго порядка отдельно от основной модели. Варьируя размер и форму трещины в работе были получены зависимости для коэффициента интенсивности напряжений первого рода. Также показано, что наиболее опасными будут трещины на внутренней сторонегиба.

В [10] произведена оценка влияния усталостных дефектов коррозионного происхождения на прочность магистральных трубопроводов. Представлена математическая модель влияния усталостных дефектов коррозионного происхождения на магистральные трубопроводы, позволяющая оценивать дальнейшее развитие в них трещин. Задача была реализована в программном комплексе ANSYS при помощи трехмерных конечных элементов. Коррозионный износ был смоделирован в виде дефекта в форме суперпозиции различных эллипсоидов. В результате работы были получены диаграммы распределения напряжения в вершине трещины, с помощью которых можно провести оценку долговечности трубопровода для различных форм дефектов.

Данная работа посвящена изучению долговечности трубопровода при подвижках грунта, в том числе с учетом температуры внутренних сред.

1. Кинетическая модель разрушения с энергетическими начальными условиями

1.1. Постановка задачи

Представим вывод кинетической модели разрушения с энергетическими начальными условиями согласно [2]. Рассмотрим однородное тело, которое подвержено растяжению F , и выделим в середине тела материальный объем V_0 с массой m , как показано на рис. 4.

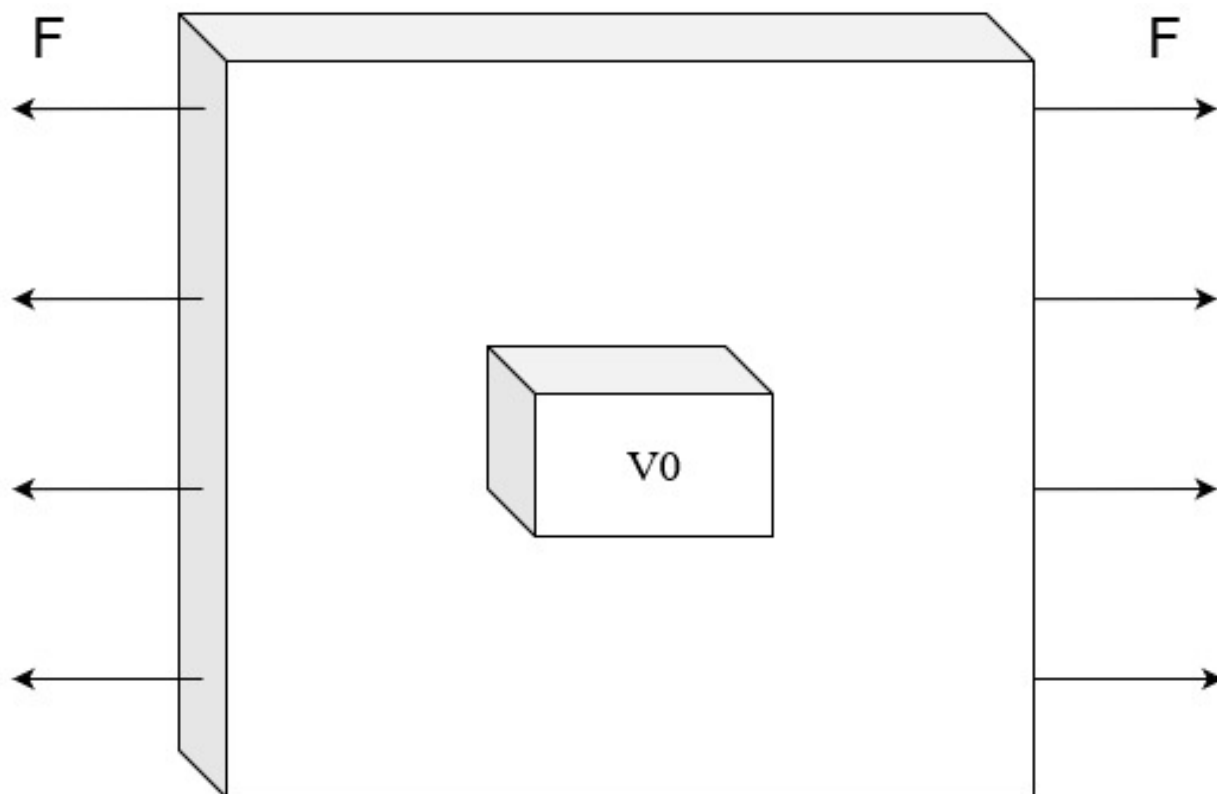


Рис. 4: Схематическое изображение рассматриваемого образца

Предположим, что в рассматриваемом фрагменте из-за приложенной нагрузки к телу начинают образовываться микротрещины общим объемом V_* , и в результате происходит изменение локальной плотности ρ . Общий объем участка образца станет $V = V_0 + V_*$, т.е. сумма объема фрагмента образца до деформации и объема всех трещин.

Запишем закон сохранения массы

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -div(\vec{v}),$$

где \vec{v} – скорость движения частиц материала.

Введем текущую локальную плотность

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m V_0}{V_0 V} = \frac{m}{V_0} \left(1 - \frac{V^*}{V}\right).$$

Обозначим $\rho_0 = \frac{m}{V_0}$ – плотность материала, из которого сделан образец, до деформации, $\omega = \frac{V^*}{V}$ – параметр поврежденности, который характеризует относительный объем повреждений в материале. Тогда

$$\rho = \rho_0 (1 - \omega).$$

Подставим выражение для локальной плотности в закон сохранения массы и получим

$$\frac{d\omega}{dt} = (1 - \omega) \operatorname{div} \vec{v}.$$

Разложим $\operatorname{div} \vec{v}$ в степенной ряд по ω

$$\operatorname{div} \vec{v} = c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2 + \dots$$

и предположим, что скорость объемного расширения отсутствует, если нет поврежденности, т.е.

$$\operatorname{div} \vec{v}|_{\omega=0} = 0 \Rightarrow c_0 = 0,$$

тогда

$$\frac{d\omega}{dt} = c_1\omega (1 - \omega)f(\omega).$$

Рассмотрим $f(\omega) = A\sigma^k/c_1$, где $A(T)$ и $k(T)$ – константы материала, зависящие от температуры T , $\sigma = P/(1 - \omega)$ – локальное среднее напряжение в рассматриваемой точке образца. Здесь $P = F/S_0$, S_0 – начальная площадь поперечного сечения тела. Тогда уравнение принимает вид

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{A\omega P^k}{(1 - \omega)^{k-1}}. \quad (1)$$

Таким образом получаем модель поврежденности типа Качанова-Работнова, т.е. уравнение данного вида является законом сохранения массы в терминах поврежденности. Согласно [1] будем ставить началь-

ные условия для уравнения поврежденности исходя из того, что в образце уже имеется начальная поврежденность, которая оценивается при помощи фрактальной идеологии. Фрактал – геометрический объект с дробной метрической размерностью. Предполагается, что поврежденность может быть смоделирована как разреженный (лакунарный) фрактал, т.е. как периодическую систему микротрещин. В начальный момент времени материал бездефектный и $\omega = 0$. С увеличением числа периодов трещин увеличивается и когда он становится близким к 1 микротрещины начинают объединяться. Накопленная энергия требующаяся для увеличения периода трещин может оцениваться при помощи фрактальной размерности. Когда $\omega = 1$ совокупность всех микротрещин становится одной макротрещиной, и происходит разрыв. Тогда становится естественным условие $P|_{\omega=1} = \sigma_u$, где σ_u временной предел прочности при растяжении.

Тогда исходя из фрактальной интерпретации задачи решим дифференциальное уравнение (1) со следующим начальным условием

$$\omega|_{t=0} = \frac{P^2}{\sigma_u^2}, \quad (2)$$

т.е. при приложении нагрузки P в статической постановке задачи уровень поврежденности мгновенно увеличивается до $\frac{P^2}{\sigma_u^2}$.

В качестве критерия разрушения будем считать условие

$$\omega|_{t=t_*} = 1, \quad (3)$$

т.е. в момент разрушения t_* поверхность разрушения занимает все поперечное сечение тела, таким образом, из данного уравнения можем получить время до разрушения.

Получаем решение в виде

$$\omega = 1 - \left(\left(1 - \frac{P^2}{\sigma_u^2} \right)^{k+2} - (k+2)AP^k t \right)^{\frac{1}{k+2}}.$$

Отсюда время до разрушения образца

$$t_* = \frac{(1 - (P/\sigma_u)^2)^{k+2}}{A(k+2)P^k}. \quad (4)$$

1.2. Зависимость констант модели разрушения от температуры

Применим кинетическую модель разрушения с энергетическими начальными условиями для жаропрочного сплава на никелевой основе ХН70ВМТЮ, аппроксимируя экспериментальные данные [13]. Константы модели $A(T)$ и $k(T)$ подбирались путем проведения множества численных экспериментов в программном комплексе Wolfram Mathematica [6]. На рис. 5 в логарифмических координатах изображена диаграмма длительной прочности при различных температурах $T = 600^\circ\text{C}; 700^\circ\text{C}; 800^\circ\text{C}; 900^\circ\text{C}$; 9 точками отмечены экспериментальные данные из [13]. По оси x отложено время до разрушения, а по оси y напряжение возникающее в образце.

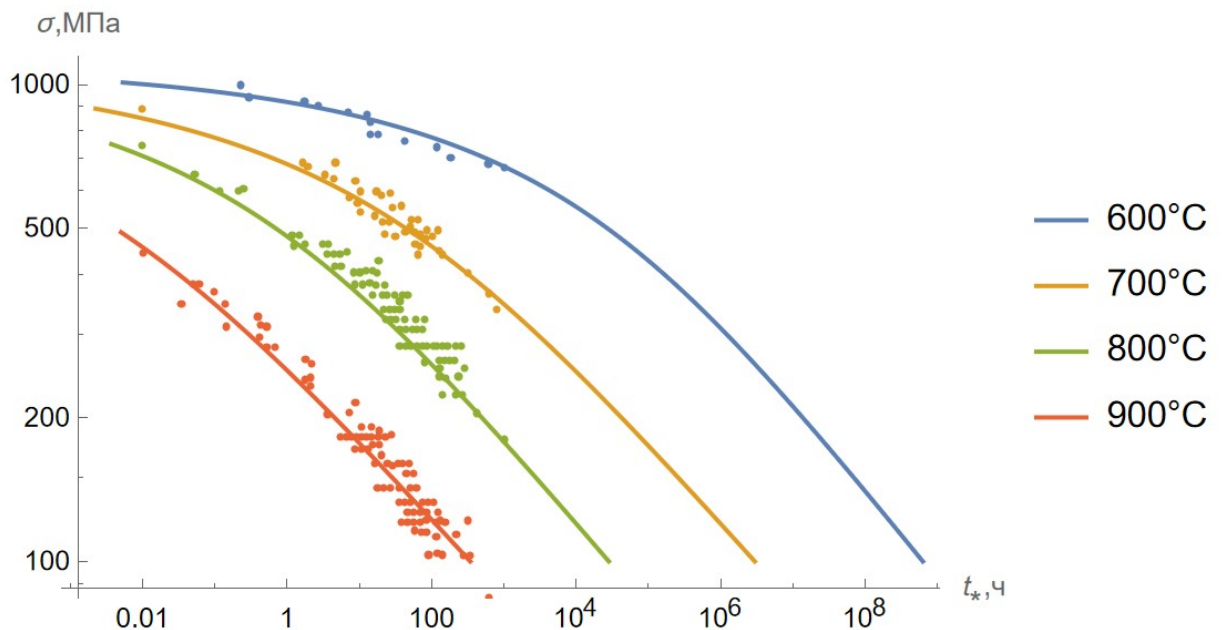


Рис. 5: Диаграмма длительной прочности стали ХН70ВМТЮ для различных температур

Отметим, что преимуществом данной модели разрушения является то, что для того, чтобы описать все участки диаграммы длительной

прочности, достаточно использовать одну модель с единожды подобранными коэффициентами A и k . Для дальнейшей работы с данной моделью исследуем зависимость этих констант от температуры.

На рис. 6 и рис. 7 изображены зависимости A и k от температуры соответственно. Точки, соединенные кривыми синего цвета, являются значениями констант модели, подобранные в ходе численных экспериментов при аппроксимации экспериментальных данных длительной прочности образца. Красные кривые аппроксимируют данные значения для констант A и k .

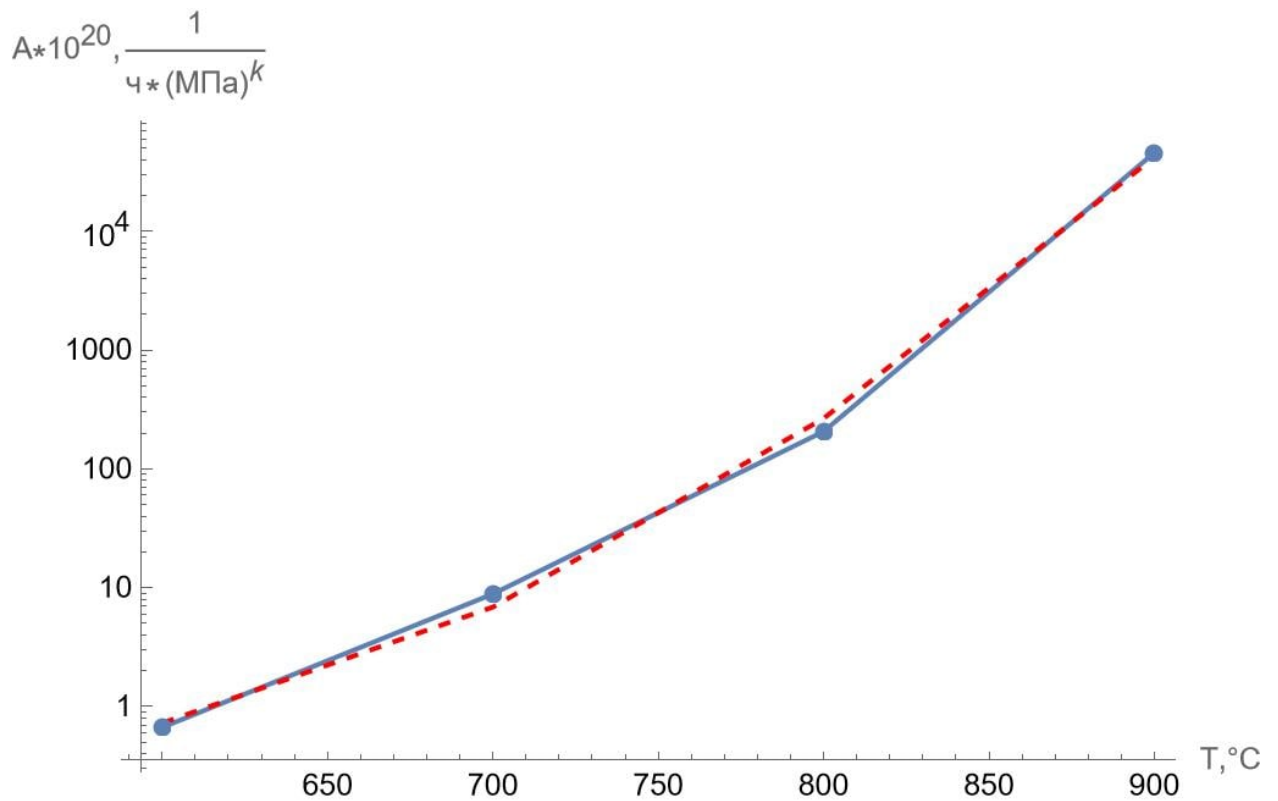


Рис. 6: График зависимости константы модели A от температуры

Для аппроксимации данных A была найдена функция вида

$$A_{ap}(T) = \exp [a_A T^2 + b_A T + c_A] ,$$

а для $k(T)$

$$k_{ap}(T) = \frac{a_k T + b_k}{c_k T + d_k},$$

где константы $a_A, b_A, c_A, a_k, b_k, c_k, d_k$ численно найдены при аппроксимации.

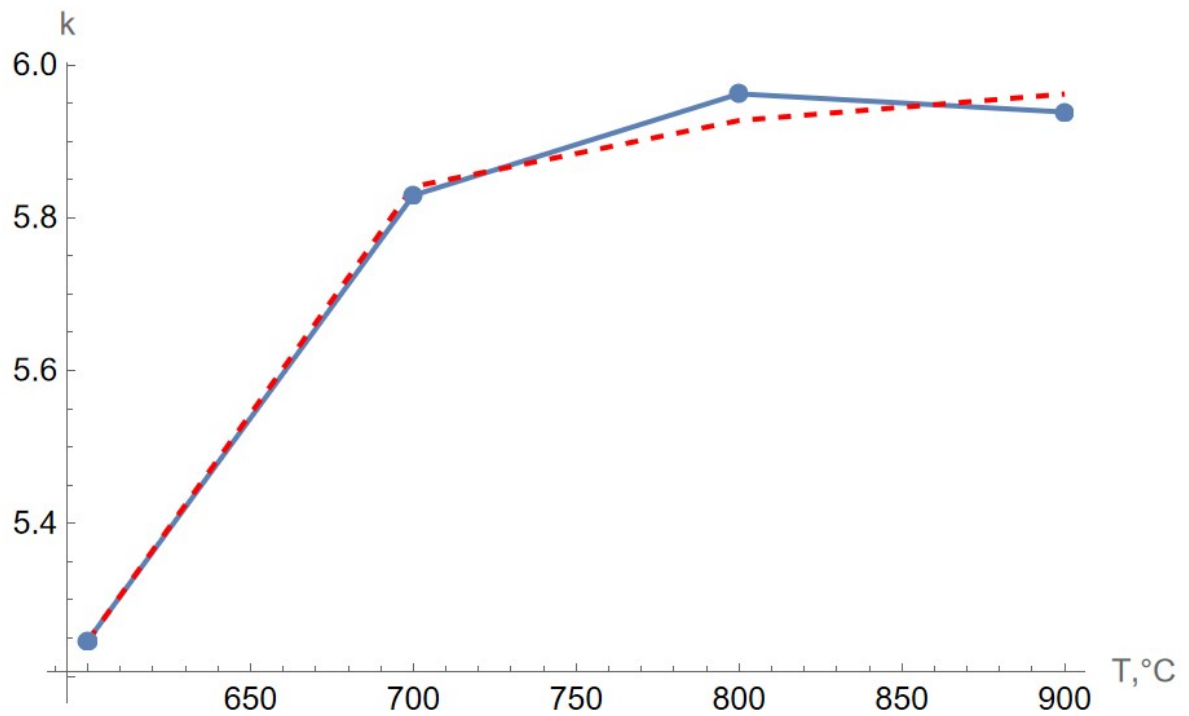


Рис. 7: График зависимости константы модели k от температуры

Пользуясь функциями $A_{ap}(T)$ и $k_{ap}(T)$, можно прогнозировать значения A и k для других температур. Тогда мы можем получить кривые длительной прочности образцов при других различных температурах из этого промежутка, даже не имея экспериментальных данных.

2. Модель длительной прочности трубопровода при подвижках грунта

2.1. Постановка задачи

Рассмотрим однопролетную цилиндрическую трубу длины l с кольцевым сечением с внешним радиусом R и внутренним радиусом r (рис. 8, 9). Введем систему координат: сонаправим ось x с центральной осью трубы, а ось y направим вертикально вниз.

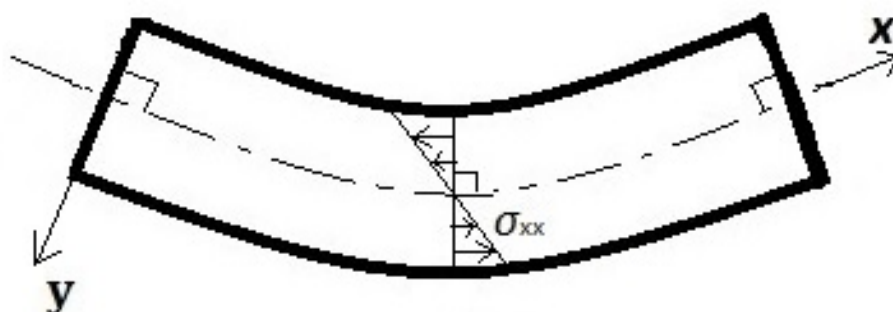


Рис. 8: Схема трубы

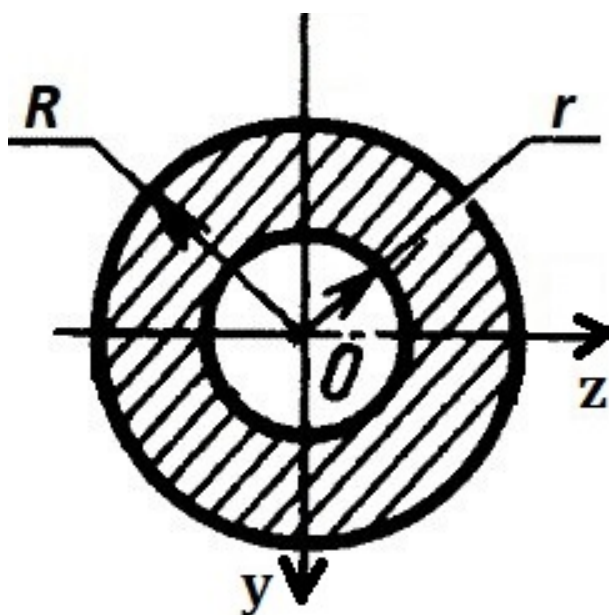


Рис. 9: Схема поперечного сечения трубы

Будем решать задачу в рамках теории Эйлера-Бернулли. В качестве граничных условий, которые моделируют ситуацию подвижек грунта, зададим условия на вертикальные смещения $v(x)$ (прогиб) и углы наклона центральной оси трубы $v'(x)$ на ее концах:

$$\begin{aligned}v(0) &= v_0, \quad v(l) = v_l \\v'(0) &= \phi_0, \quad v'(l) = \phi_l\end{aligned}$$

где l – длина трубы.

Будем искать напряжение в виде суммы напряжений от изгиба трубы и осевого натяжения, вызванного удлинением трубопровода вследствие его изгиба

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{\text{изг}} + \sigma_{xx}^{\text{ос}}.$$

Воспользовавшись формулами Коши и Законом Гука, получаем изгибные напряжения [22]

$$\sigma_{xx} = -Ey \frac{d^2v}{dx^2},$$

где E – модуль Юнга.

Для того чтобы найти осевое натяжение, вызванное удлинением трубы, рассмотрим бесконечно малый фрагмент оси трубы с начальной длиной dx . После деформации длина элемента станет dl^* , а разность прогибов на левом и правом концах фрагмента dv . Тогда

$$dl^* = \sqrt{dx^2 + dv^2} = \sqrt{1 + v'^2} dx.$$

Сделав допущения, что v'^2 мала по сравнению с единицей, разложим dl^* в ряд Тейлора в ее окрестности и, проинтегрировав выражение, получим длину всей трубы после деформации

$$l^* = l + \frac{1}{2} \int_0^l v'^2 dx.$$

Получаем относительное удлинение и по закону Гука находим на-

пряжение

$$\sigma_{xx} = E e_{xx}^{oc} = E \left(\frac{l^* - l}{l} \right) = \frac{E}{2l} \int_0^l v'^2 dx. \quad (5)$$

Тогда получаем полное выражение для напряжения σ_{xx}

$$\sigma_{xx} = -Ey \frac{d^2v}{dx^2} + \frac{E}{2l} \int_0^l v'^2 dx. \quad (6)$$

Воспользуемся моделью длительной прочности, выведенной в прошлой главе, и подставим в нее напряжения, выраженные через прогиб, тогда получаем

$$t_* = \frac{(1 - (\sigma_{xx}/\sigma_u)^2)^{k+2}}{A(k+2)\sigma_{xx}^k} = \frac{\left(1 - \left(\left(-Ey \frac{d^2v}{dx^2} + \frac{E}{2l} \int_0^l v'^2 dx\right) / \sigma_u\right)^2\right)^{k+2}}{A(k+2) \left(-Ey \frac{d^2v}{dx^2} + \frac{E}{2l} \int_0^l v'^2 dx\right)^k}.$$

Для того чтобы определить время разрушения, необходимо найти экстремальные напряжения, поэтому для $\sigma_{xx}^{изг}$ будем рассматривать $y = -R$ и максимизировать $\frac{d^2v}{dx^2}$. Получаем следующее выражение для времени разрушения

$$t_* = \frac{\left(1 - \left(\left(\max \left(ER \frac{d^2v}{dx^2}\right) + \frac{E}{2l} \int_0^l v'^2 dx\right) / \sigma_u\right)^2\right)^{k+2}}{A(k+2) \left(\max \left(ER \frac{d^2v}{dx^2}\right) + \frac{E}{2l} \int_0^l v'^2 dx\right)^k} \quad (7)$$

Таким образом мы получаем модель длительной прочности трубопровода при подвижках грунта, с помощью которой можно предсказать время до разрушения трубопровода при данной заделке его концов.

2.2. Вывод функции прогиба

При изгибе трубопровод стремится занять положение, соответствующее минимуму потенциальной энергии. Для того, чтобы найти время до разрушения, необходимо вывести функцию прогиба трубы, для это-

го запишем выражение для удельной потенциальной энергии

$$W = \frac{1}{2E} \sigma_{xx}^2.$$

Проинтегрировав удельную потенциальную энергию W по всему объему трубы V , получаем выражение для потенциальной энергии в виде функционала F

$$F = \iiint_V W dV = \frac{1}{2E} \int_0^l \left(\iint_S \sigma_{xx}^2 dS \right),$$

где $S = \pi(R^2 - r^2)$ – площадь поперечного сечения трубы.

Проведя ряд преобразований, получаем следующее выражение для функционала

$$F = \int_0^l \frac{E}{2} \left(S \left(\frac{1}{2l} \int_0^l v'^2 dx \right) + J_z v''^2 \right) dx,$$

где $J_z = \frac{\pi(R^4 - r^4)}{4}$ – момент инерции поперечного сечения относительно оси Oz .

Для того чтобы определить экстремум функционала потенциальной энергии найдем его вариацию и приравняем 0

$$\delta F = 0. \quad (8)$$

В результате после проведения некоторых преобразований получаем общее дифференциальное уравнение изгиба

$$E J_z v^{IV} - K v'' = 0, \quad (9)$$

где заменили

$$K = ES \left(\frac{1}{2l} \int_0^l v'^2 dx \right) \quad (10)$$

Решая данное дифференциальное уравнение, получаем уравнение изгиба трубы в общем виде

$$v = c_1 + c_2 x + c_3 \exp\left(\sqrt{\frac{K}{EJ_z}}\right) + c_4 \exp\left(-\sqrt{\frac{K}{EJ_z}}\right), \quad (11)$$

где c_i , $i = \overline{1,4}$ — константы интегрирования, которые находятся из граничных условий.

Отметим, что данное дифференциальное уравнение является интегро-дифференциальным, т.е. для того чтобы получить полное решение, необходимо воспользоваться численными методами, поэтому все дальнейшие вычисления проводились в программном комплексе Wolfram Mathematica. На первом этапе решения уравнения, полагается $K = const$, таким образом, подставив v в выражение для K , получаем уравнение, в котором остается неизвестной только K . Численно находим его значение и подставляем в v , таким образом получаем выражение для прогиба трубы, с помощью которого мы определяем экстремальные напряжения и время до разрушения.

3. Результаты расчетов для трубопроводной стали

3.1. Численные расчеты для аналитической модели длительной прочности трубопроводов

Численное моделирование проводилось на примере трубопровода, произведенного из американской стали AISI 304, которая является аналогом российской трубопроводной стали 08X18H10, со следующими физическими свойствами

$$E = 200 \text{ ГПа}, \sigma_u = 505 \text{ МПа}$$

Рассмотрим трубу со следующими геометрическими характеристиками

$$l = 20 \text{ м}, R = 0.610 \text{ м}, r = 0.596 \text{ м}$$

Будем решать задачу для следующих граничных условий (условий заделки)

$$\begin{aligned} v(0) &= 0, \quad v(l) = v_1 \\ v'(0) &= 0, \quad v'(l) = 0 \end{aligned} \tag{12}$$

где v_1 принимает значение от $\frac{R}{15}$ до $\frac{6R}{15}$, таким образом моделируются подвижки грунта: чем больше значения прогиба, тем больше земля просела. При такой заделке трубопровод примет положение, как показано на рис. 10 [15].

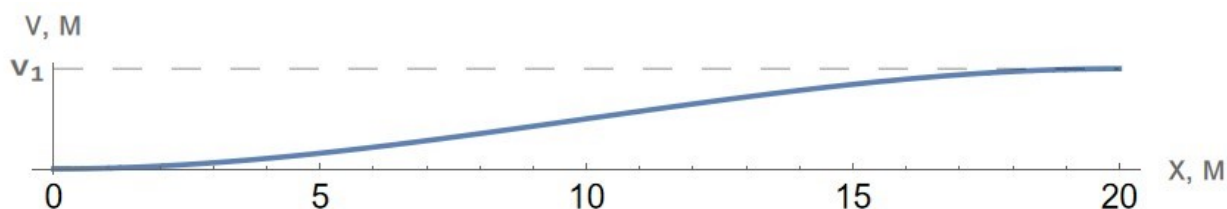


Рис. 10: Изгиб трубы

Для нахождения длительной прочности и зависимости времени разрушения от прогиба трубопровода был реализован следующий алго-

ритм.

Будем совершать следующие действия в цикле по v_1 с шагом $\frac{R}{30}$

1. Составляем СЛАУ, состоящую из граничных условий, в которые подставлено выражение для $v(x)$, и решаем ее относительно констант c_i , $i = \overline{1, 4}$ с помощью команды `Solve` и получаем выражения $c_i(K)$.
2. Подставляем полученные выражения констант в выражение для K , решаем полученное уравнение относительно K с помощью команды `NSolve`, и получаем численное значение K .
3. Подставляем K в выражение для констант c_i и $v(x)$ получаем выражение для прогиба $v(x)$
4. Подставляем $v(x)$ в выражение для σ_{xx} и t_* , заносим полученные значения для напряжения σ_{xx} , прогиба v_1 и времени разрушения t_* в массивы.
5. Переход к следующему шагу цикла, возвращаемся к п.1

Используя данный алгоритм были подобраны константы $A(T)$ и $k(T)$, аналогично как и в параграфе 1.2, аппроксимированы экспериментальные данные длительной прочности для стали 304 [20]. Таким образом получаем зависимости времени разрушения от напряжения возникающего в трубопроводе вследствие подвижек грунт. На рис. 11 в логарифмических шкалах представлена данная зависимость для температур $T = 540^\circ\text{C}; 650^\circ\text{C}$, где T будем считать температурой внутренних сред, и точками отмечены экспериментальные данные. Влияние данных температур на напряжение считаются малыми и не учитываются в модели изгиба трубопровода, т.е. в модели длительной прочности трубопроводов при подвижках грунта от T будут зависеть только константы материала A и k .

Далее с помощью массивов значений для прогиба и для времени разрушения были получены зависимости времени разрушения от прогиба трубопровода при подвижках грунта для различных температур

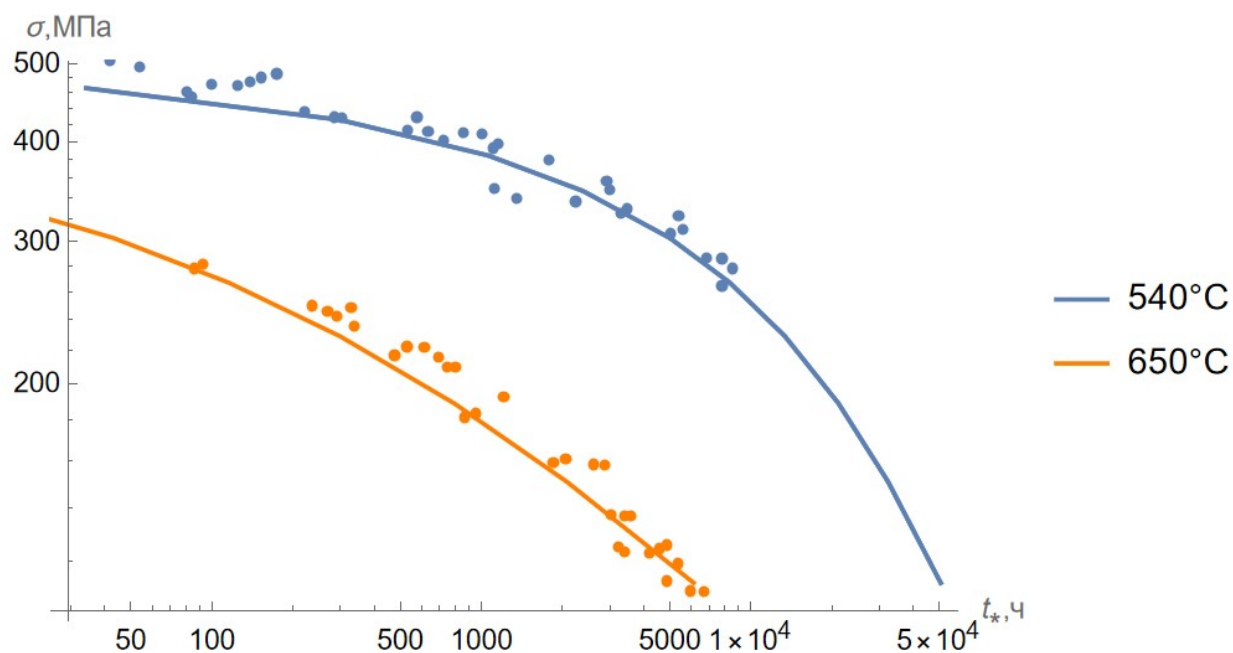


Рис. 11: Диаграмма длительной прочности стали 304 для различных температур

внутренних сред $T = 540^\circ\text{C}$; 650°C . На рис. 12 представлена данная диаграмма в логарифмических традиционных шкалах, а на рис. 13 в линейных, т.к. для прогиба отобразили более показательную картину. Можем отметить что при маленьких значениях прогиба наблюдается большое влияние температуры внутренней среды на время разрушения трубопровода: при уменьшении T на 110°C рассчитанный срок эксплуатации увеличивается более чем в 6 раз.

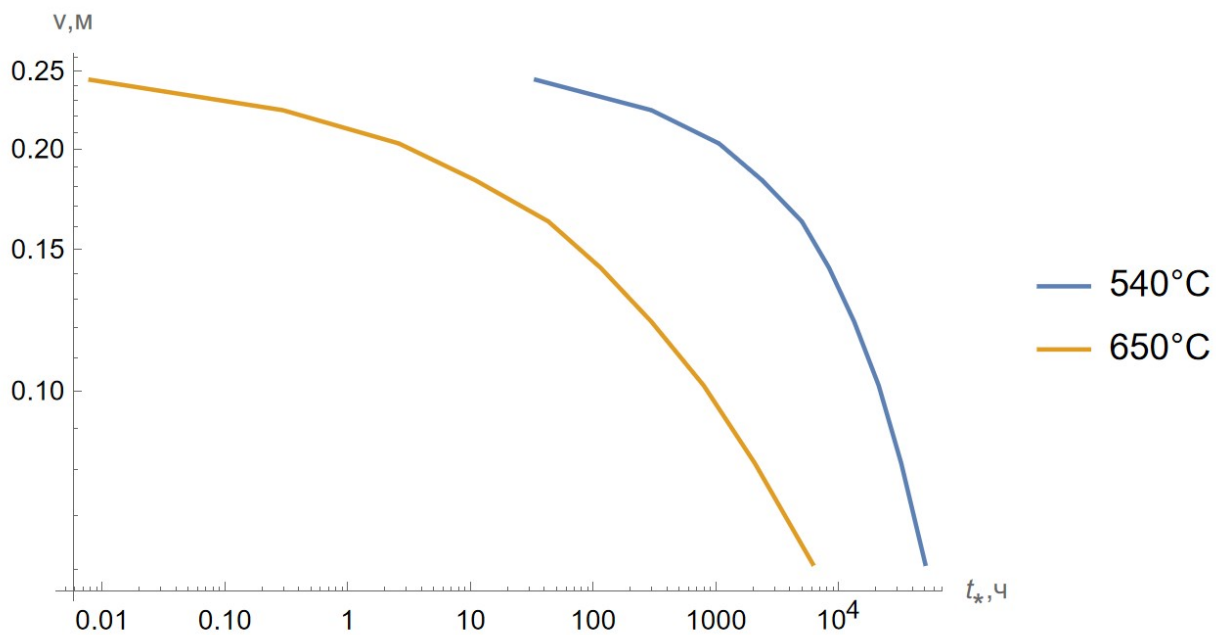


Рис. 12: График зависимости времени разрушения от прогиба трубопровода в логарифмических координатах

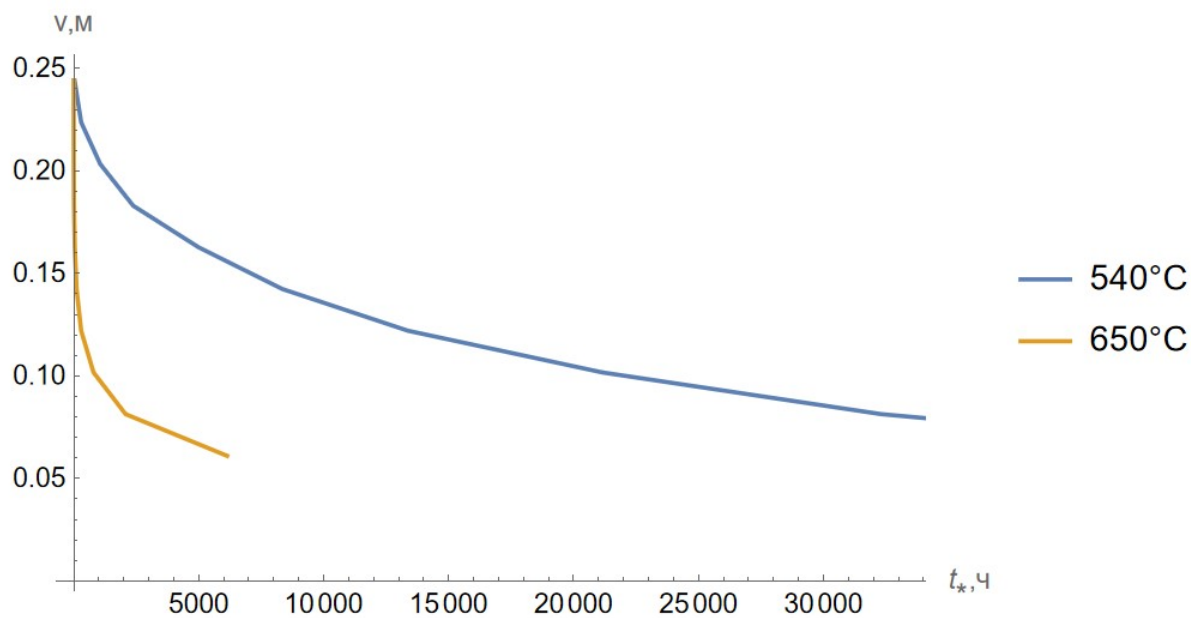


Рис. 13: График зависимости времени разрушения от прогиба трубопровода в линейных координатах

3.2. Результаты, полученные в Ansys

Применим ранее полученную модель разрушения трубопроводов при подвижках грунта к напряжением, полученным в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL [5], [3]. Рассмотрим трубопроводы с физическими и геометрическими характеристиками, как в параграфе 3.1 при граничных условиях (12) и температуре внутренней среды $T = 540^\circ\text{C}$. Будем их моделировать с помощью одномерных и трехмерных элементов. Сравним зависимости времени разрушения от прогиба, полученные с помощью аналитической модели из параграфа 3.1 и конечно-элементных моделей из одномерных и трехмерных элементов в ANSYS.

Для одномерной модели были использованы балочные элементы beam188 с кольцевым сечением с внешним радиусом R и внутренним r . Геометрия задается в виде отрезка длины l . Строится конечно-элементная сетка состоящая из n одинаковых элементов, как показано на рис. 14, сходимость решения по сетке наблюдается начиная с $n = 200$.

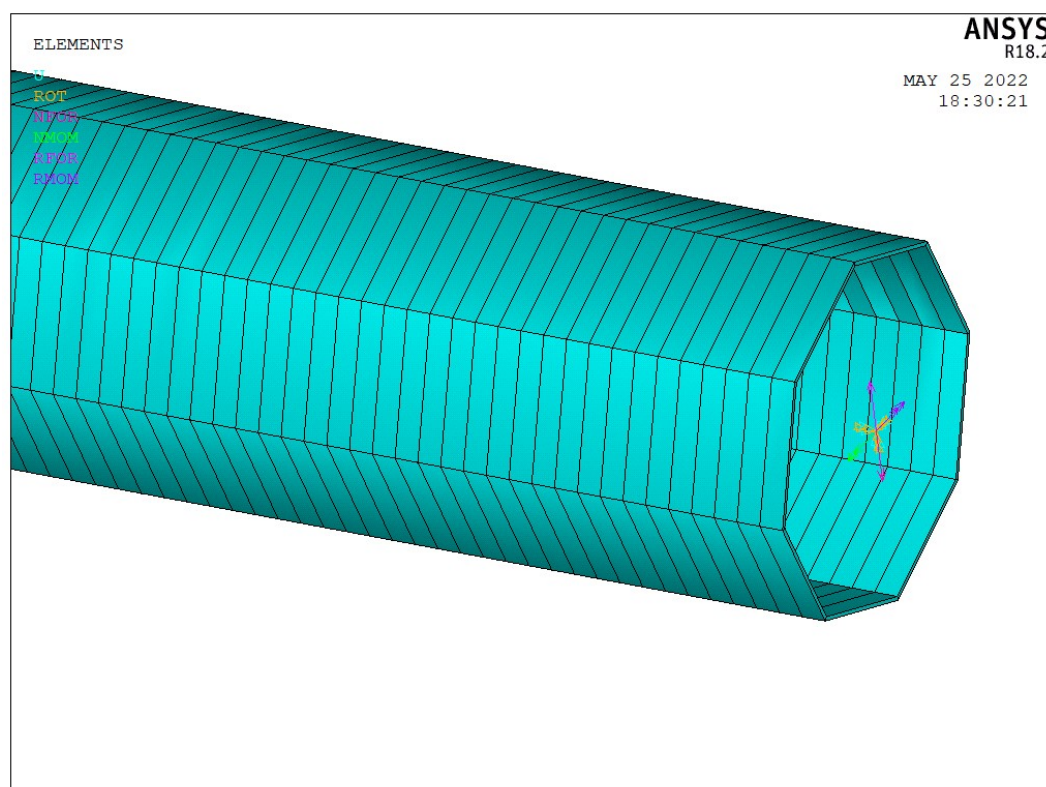


Рис. 14: Одномерная конечно-элементная модель

Граничные условия, заданные на концах трубопровода задаются в

цикле по прогибу v_1 , тем самым моделируем подвижки грунта. Также в цикле на каждом шаге записываются в массив максимальные напряжения для данного прогиба. На рис. 15 показана эпюра напряжений для одномерной задачи, полученная в ходе решения на одном из шагов цикла.

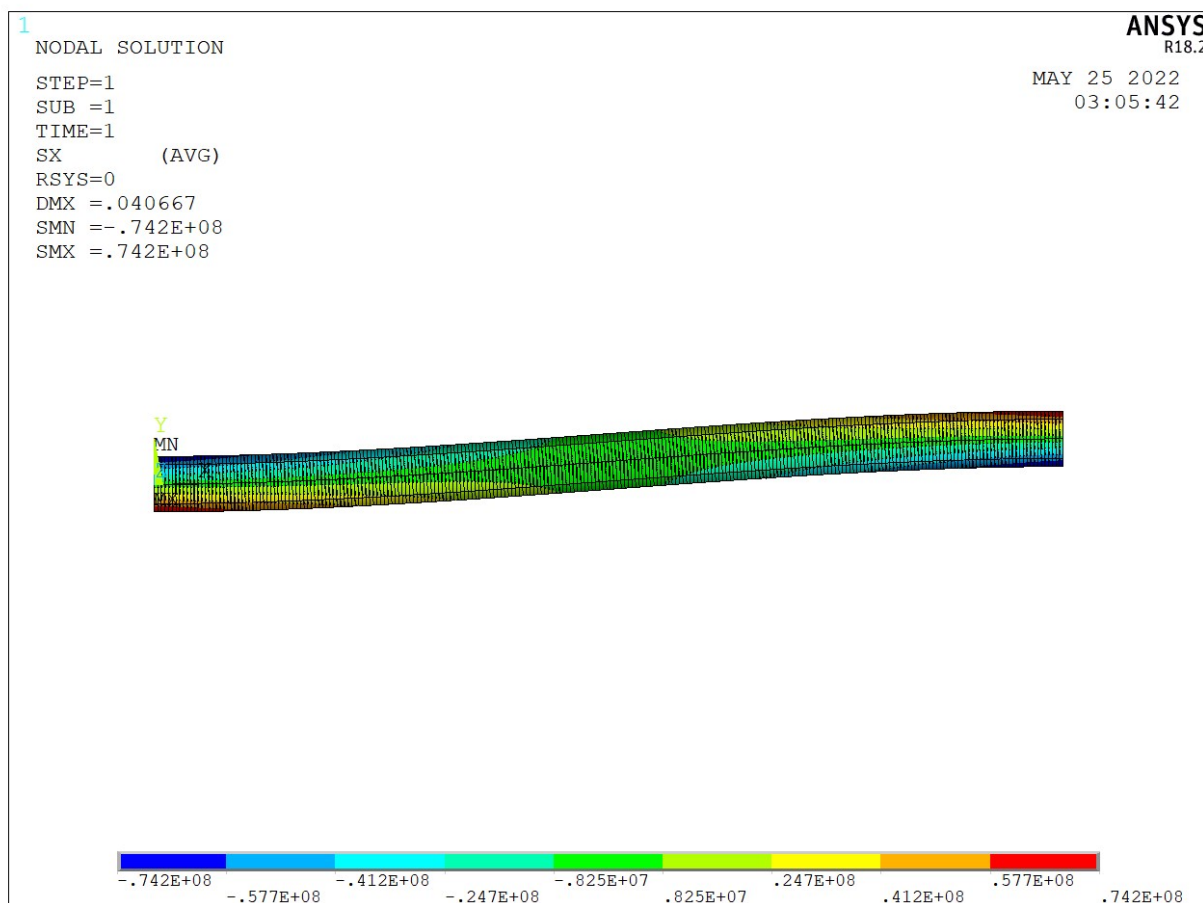


Рис. 15: Эпюра напряжений для одномерной конечно-элементной модели

При рассмотрении данной задачи в трехмерной постановке геометрия задается в виде тонкостенного цилиндра длины l , внешним радиусом R и внутренним r . Для построения конечно-элементной сетки были использованы тетраэдральные элементы solid 185 с характеристиками материала описанными ранее, как на рис. 16.

Аналогично одномерной модели решаем задачу в цикле по прогибу и записываем значения максимальных напряжений в массив. Также в цикле на каждом шаге записываются в массив максимальные напря-

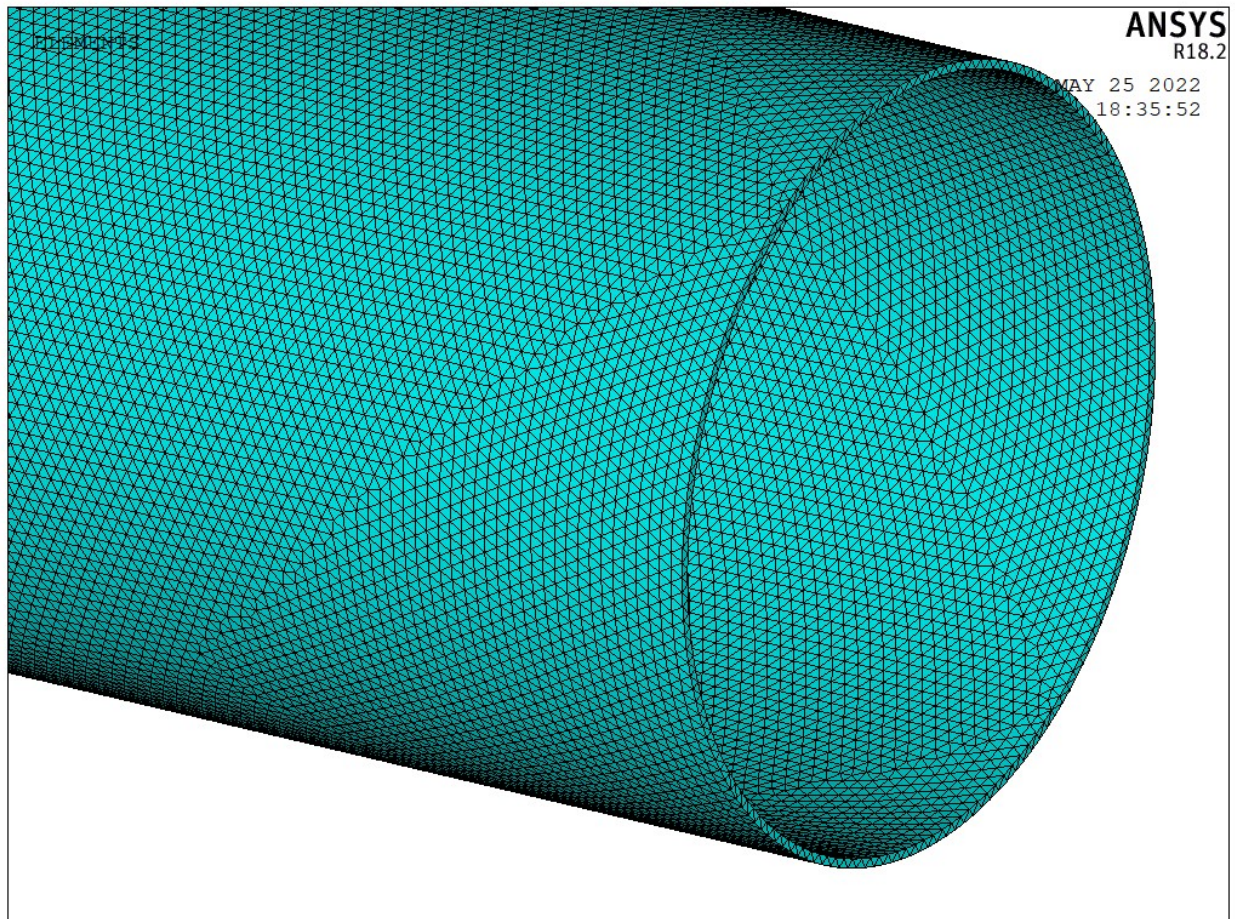


Рис. 16: Трехмерная конечно-элементная модель

жения для данного прогиба. На рис. 17 показана эпюра напряжений для трехмерной задачи, полученная в ходе решения на одном из шагов цикла.

Для того чтобы получить массив значений времени разрушения трубопровода при подвижках грунта, воспользуемся формулой (4), и подставим в нее значения максимальных напряжений, полученных с помощью одномерной конечно-элементной модели. Аналогично получим массив значений времени разрушения трубопровода для трехмерной модели. Воспользуемся массивом значений прогиба v_1 и константами материала A и k , полученные в параграфе 3.1 и построим зависимости времени разрушения от прогиба трубопровода. На рис. 18 представлены графики этих зависимостей для одномерной и трехмерной конечно-элементных моделей и аналитической модели, численно решенной в параграфе 3.1.

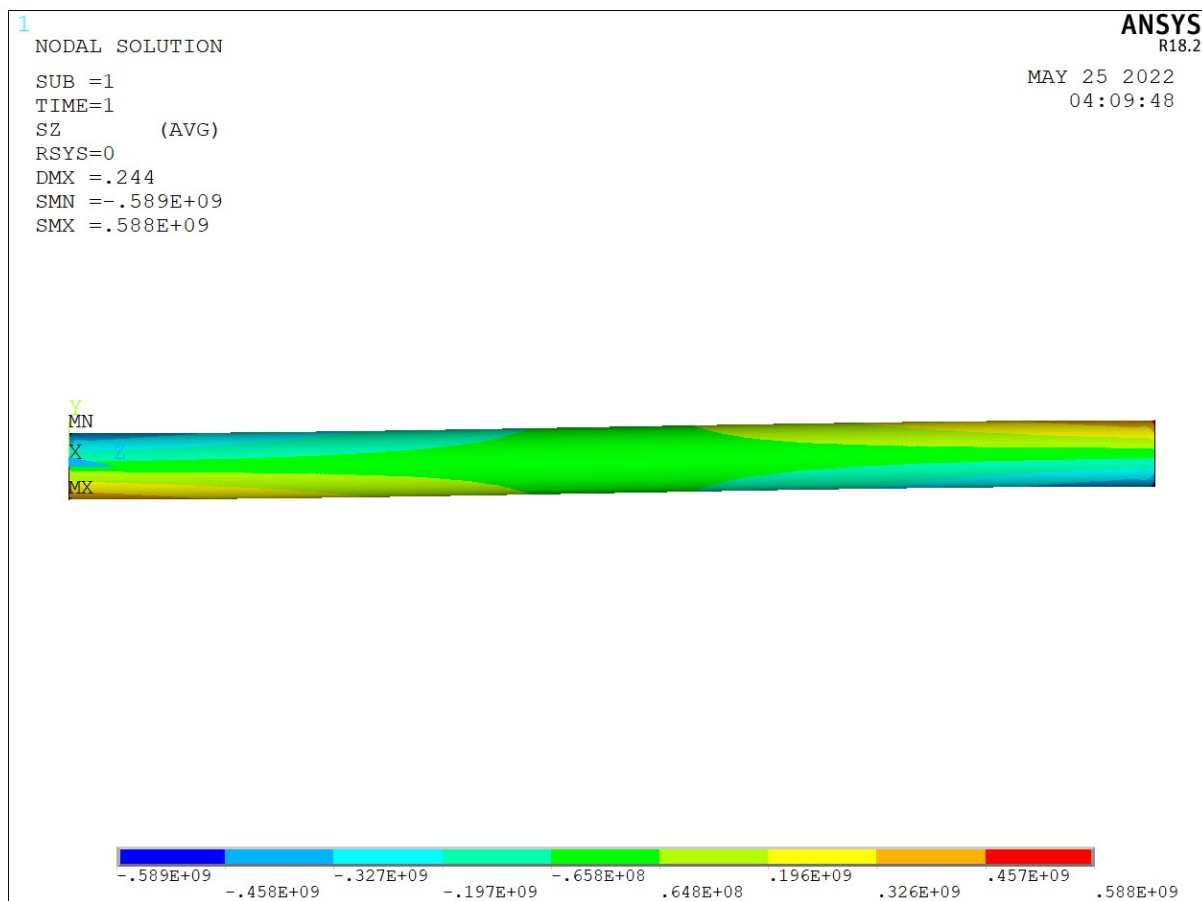


Рис. 17: Эпюра напряжений для трехмерной конечно-элементной модели

Отметим, что аналитическое решение оказалось близким к решению с помощью конечных методов для одномерных элементов. Конечно-элементное решение трехмерной задачи дает более полную оценку долговечности трубопроводов за счет учета большего числа параметров конструкции. В дальнейшем для первичной “грубой” оценки долговечности можно использовать аналитическую или конечно-элементную одномерную модель, а для более точной оценки в потенциальных местах разрыва можно применять трехмерную конечно-элементную модель.

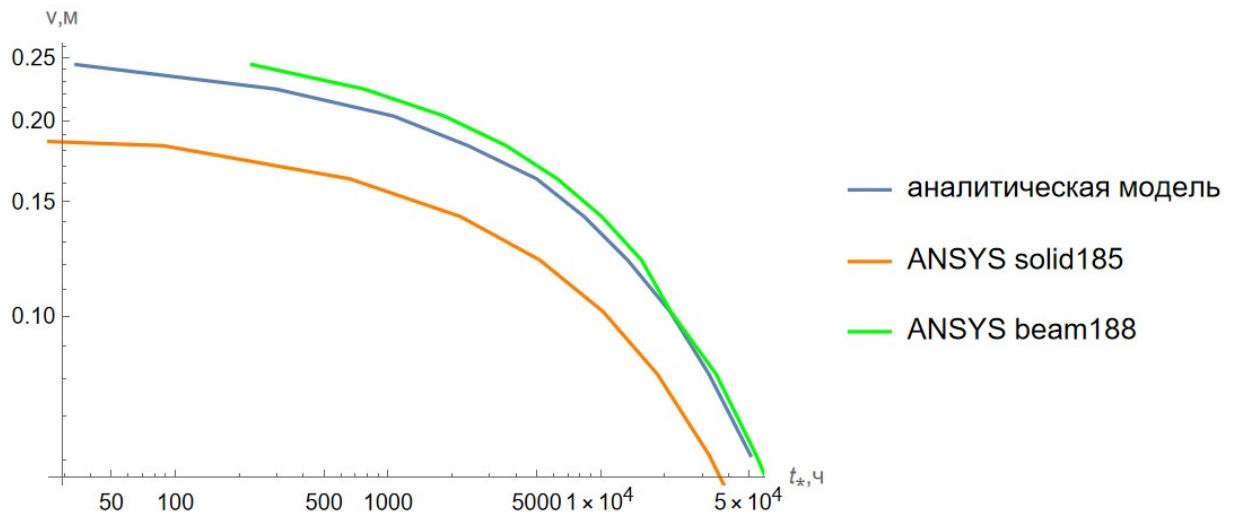


Рис. 18: График зависимости времени разрушения от прогиба трубопровода, полученные в ANSYS и из аналитической модели

Заключение

В ходе работы были получены следующие результаты:

- на основе модифицированной кинетической модели длительной прочности и единой системы определяющих констант получены двухстадийные диаграммы длительной прочности для ряда конструкционных материалов, включая трубные стали;
- исследованы константы модифицированной кинетической модели длительной прочности и их зависимости от температуры;
- построена комбинированная модель разрушения трубопровода при подвижках грунта на основе численного решения краевой задачи и кинетической модели длительной прочности;
- с помощью программного комплекса Wolfram Mathematica получены зависимости времени разрушения от прогиба трубы при различных температурах внутренних сред;
- проведено сравнение зависимостей времени разрушения от прогиба трубопровода, полученных численно из аналитической модели

разрушения и с помощью программного комплекса ANSYS для одномерных и трехмерных конечных элементов.

В дальнейшей работе планируется применение кинетической модели разрушения к моделям автомобилей с целью предсказать “слабые места” в конструкции автомобиля и определить их длительную прочность.

Список литературы

- [1] Kashtanov Arseny, Petrov Yuri. Fractal models in fracture mechanics // International journal of fracture. — 2004. — Vol. 128, no. 1. — P. 271–276.
- [2] Kashtanov AV, Petrov Yu V. Energy approach to determination of the instantaneous damage level // Technical physics. — 2006. — Vol. 51, no. 5. — P. 604–608.
- [3] Moaveni Saeed. Finite element analysis theory and application with ANSYS, 3/e. — Pearson Education India, 2011.
- [4] Multi-scale dynamic fracture model for quasi-brittle materials / Yu V Petrov, Bhushan Lai Karihaloo, VV Bratov, AM Bragov // International Journal of Engineering Science. — 2012. — Vol. 61. — P. 3–9.
- [5] Thompson Mary Kathryn, Thompson John M. ANSYS mechanical APDL for finite element analysis. — Butterworth-Heinemann, 2017.
- [6] Torrence Bruce F, Torrence Eve A. The Student's Introduction to Mathematica and the Wolfram Language. — Cambridge University Press, 2019.
- [7] A review of creep analysis and design under multi-axial stress states / Hua-Tang Yao, Fu-Zhen Xuan, Zhengdong Wang, Shan-Tung Tu // Nuclear Engineering and Design. — 2007. — Vol. 237, no. 18. — P. 1969–1986.
- [8] Арутюнян РА. Высокотемпературное охрупчивание и длительная прочность металлических материалов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2015. — no. 2. — P. 96–105.
- [9] Бобова Мария. Состояние трубопроводов в России: старое против нового // Добывающая промышленность. —

Р. 74–82. — URL: <https://dprom.online/oilngas/sostoyanie-truboprovodov-v-rossii-staroe-protiv-novogo/>.

- [10] Вансович Константин Александрович, Беселия Давид Симонович, Нахлесткин Александр Александрович. Оценка влияния усталостных дефектов коррозионного происхождения на прочность магистральных трубопроводов с позиции механики разрушения // Деловой журнал Neftegaz. RU. — 2019. — no. 12. — P. 38–42.
- [11] Жернаков Владимир Сергеевич, Будилов Игорь Николаевич. Моделирование развития трещины в зонегиба технологического трубопровода // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2017. — Vol. 21, no. 1 (75). — P. 17–23.
- [12] Качанов ЛМ. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. — 1958. — Vol. 8. — P. 26–31.
- [13] Малинин Николай. Расчеты на ползучесть элементов машиностроительных конструкций 2-е изд., испр. и доп. Учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. — Litres, 2022.
- [14] Мокроусов ВИ. К вопросу об авариях магистральных нефтепроводов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2015. — no. 11-1.
- [15] Никулина Мария Максимовна, Абакаров Абдулла Мурадович. Влияние коррозии на напряженное состояние изогнутой трубы // Процессы управления и устойчивость. — 2019. — Vol. 6, no. 1. — P. 107–111.
- [16] Ползучесть и длительное разрушение узкой прямоугольной мембраны внутри высокой жесткой матрицы при пропорциональной зависимости величины поперечного давления от времени / Александр Михайлович Локощенко,

- Леонид Викторович Фомин, Юрий Генрихович Басалов, Петр Максимович Третьяков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». — 2021. — Vol. 25, no. 4. — P. 676–695.
- [17] Работнов ЮН. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР. — 1959. — P. 5–7.
- [18] Савин НВ, Чушкина ВВ. Проблема нефтегазовой отрасли: коррозионный износ трубопроводов // Актуальные вопросы энергетики. — 2020. — P. 160–164.
- [19] Тринкер Александр Борисович. Техногенные катастрофы, создание надёжной защиты // Заметки ученого. — 2018. — no. 5. — P. 53–64.
- [20] Турчин НМ, Дробышев АВ. Экспериментальные жидкометаллические стенды // М.: Атомиздат. — 1978. — Vol. 6.
- [21] Фомин Леонид Викторович. Описание длительной прочности растягиваемых стержней прямоугольного и круглого поперечных сечений в высокотемпературной воздушной среде // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. — 2013. — no. 3 (32). — P. 87–97.
- [22] Черных Климентий Феодосьевич. Введение в механику сплошных сред: учебное пособие. — ЛГУ, 1984.