

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-4>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/60TVN416.pdf>

Статья опубликована 22.08.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Баширзаде Самир Рафаил оглы Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций в сложных грунтово-геологических условиях. Часть 1. Обобщенная модель деформирования трубопровода // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/60TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 539.3: 539.4

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Россия, Пенза
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Профессор кафедры «Транспортное строительство»
Доктор технических наук
E-mail: bridgesar@mail.ru

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
Филиал в г. Сочи, Россия, Сочи
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru

Баширзаде Самир Рафаил оглы

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов¹
Аспирант кафедры «Транспортное строительство»
E-mail: s.bashirzade2010@yandex.ru

**Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций
в сложных грунтово-геологических условиях. Часть 1.
Обобщенная модель деформирования трубопровода**

Аннотация. В данной статье, представляющей собой первую часть серии статей, рассмотрена проблема построения обобщенной модели трубопровода в виде совокупности моделей: модель трубопровода, как конструктивного элемента; модели материала трубопровода; модели взаимодействия трубопровода с грунтом; модели нагружения трубопровода; модели воздействия агрессивной рабочей среды; модели наступления предельного состояния. Сначала в работе кратко проанализирована проблема аварийности трубопроводных систем и причин, приводящих к появлению аварий. Например, в качестве основных причин аварийного выхода магистральных газопроводов из строя по данным Ростехнадзора можно отметить следующие: внешнее воздействие (17%), дефекты оборудования/материала (30%), коррозия (50%). Поэтому при построении моделей деформирования трубопроводных конструкций следует учитывать возможность появления

¹ 410054, Саратов, Политехническая 77

именно этих основных причин наступления аварийных состояний трубопроводов, и отражать их в расчетных схемах.

На основе анализа этих причин и сформулированы требования к обобщенной модели трубопровода. Далее рассмотрены модели трубопровода как конструктивного элемента (трубопровод как гибкая нить; трубопровод как длинный стержень-балка, работающая на изгиб; трубопровод как оболочка); и модели материала трубопровода (нелинейная диаграмма деформирования, изменение свойств материала во времени). В последующих частях будут рассмотрены остальные составляющие обобщенной модели трубопровода (модели взаимодействия трубопровода с грунтом; модели нагружения трубопровода; модели воздействия агрессивной рабочей среды; модели наступления предельного состояния).

Ключевые слова: обобщенная модель трубопровода; аварийное состояние; модель конструктивного элемента; нить; стержень; оболочка; модель материала

Введение

Трубопроводные системы важны для эффективного функционирования топливно-энергетического комплекса. Они помогают обеспечить потребности населения основными ресурсами: нефтью, природным газом, нефтепродуктами и т.д. Обширные сети трубопроводов, как внутри страны, так и за рубежом, поддерживают жизненно важные функции государств, а также являются одним из основных факторов экономического развития. Выход из строя даже небольших участков трубопроводов, нередко сопровождающийся взрывами и пожарами, может вызвать серьезные последствия, связанные с потерей перекачиваемого продукта, высокой стоимостью ремонта, а также привести к значительному загрязнению окружающей среды.

К настоящему времени трубопроводная сеть России включает 250 тыс. км магистральных газо- и нефтепроводов (рис. 1), а также весьма разветвленную сеть внутрипромысловых трубопроводов. На этих трубопроводах происходят аварии различного уровня, приводящие к разливам перекачиваемого продукта.



Рисунок 1. Нефтегазовая инфраструктура Российской Федерации
(источник: http://im.kommersant.ru/ISSUES.PHOTO/ТЕМА/2009/156/bg_00.jpg)

В среднегодовом исчислении один разлив на магистральном нефтепроводе приводит к: загрязнению нефтью используемых земель сельскохозяйственного назначения, а также 350 кубометров промысловых водоемов [1].

В год происходит до 7200 случаев разливов, приводящих к значительному ущербу из-за попадания в почву 2,15 миллионов тонн нефтепродуктов и загрязнения земли на площади 28,8 тыс. гектаров. И хотя утечки величиной до 50 тонн нефтепродуктов, как ни странно, считаются малыми, в суммарном выражении объем проливов за год достигает 1,64 миллионов тонн. В результате в процессе транспортировки нефти за год проливается около 3,79 миллионов тонн.

При эксплуатации месторождений в арктических регионах, природа которых весьма ранима и трудно поддается восстановлению, ситуация еще больше усугубляется. Если же к этому дополнительно прибавляются сложные геодинамические природные условия, характеризующиеся высокими уровнями напряжений в горных породах, создаваемыми под влиянием естественных напряжений в гравитационно-тектонических полях, высокой неоднородностью горных массивов, значительной сейсмичностью отдельных регионов, то можно сделать вывод о том, что проектирование трубопроводов должно проводиться с учетом указанных особенностей, а строительство должно выполняться с применением специальных технологий [1].

Сказанное выше свидетельствует о наличии фактора геологической обусловленности аварий на магистральных трубопроводах. Можно полагать, что действует скрытый механизм влияния геологической ситуации на надежность работы трубопроводного транспорта, который требует разработки специальных проектов сооружения трубопроводов. Например, так как трассы трубопроводов проекта «Сахалин-2» проходят по 19 критическим участкам, включающим сейсмические разломы [2], то по каждому из разломов проводились специальные изыскательские работы, а строительство трубопроводов на этих участках производилось по отдельным проектам. Такие же работы выполнялись и на других трубопроводах («Сахалин-1», ВСТО, «Голубой поток» и др.).

В связи с этим важное значение приобретает проблема компьютерного моделирования и прогнозирования поведения трубопроводов в процессе эксплуатации с учетом всего комплекса факторов, действующих на трубопровод (силовые нагрузки, сложные грунтово-геологические условия, сейсмичность района пролегания трубопровода – сейсмические нагрузки, температурные воздействия, воздействие агрессивной эксплуатационной среды).

1. Анализ аварийности трубопроводных систем и причин, вызывающих аварии

К сожалению, полная информация обо всех авариях на магистральных трубопроводах отсутствует, так как данные добывающих компаний и экологических организаций существенно расходятся. Мнения российских исследователей относительно причин аварий также расходятся, и ученые до сих пор не могут прийти к определенному согласию. Одни ученые утверждают, что аварии вызываются только техногенными факторами (дефектами материала или строительства, механическими воздействиями и т.д.) или катастрофическими явлениями (землетрясениями, разливами рек, карстовыми явлениями и т.д.). Другие исследователи к числу причин возникновения аварий относят неблагоприятные природные условия, к которым прежде всего относятся зоны разломов земной коры. При этом и те, и другие констатируют весьма труднообъяснимый факт – это концентрацию аварий около одних разломов и безопасность вблизи других, даже более мощных и активных [3].

Так как информация об аварийности трубопроводных систем содержится в ряде международных баз данных, то при анализе аварийности трубопроводных систем и причин, вызывающих эти аварии, используем информацию из следующих баз данных (БД) [4]:

- база данных Европейской группы по сбору данных об авариях на газопроводах **EGIG** (European Gas Pipeline Incident Data Group);
- база данных Ассоциации операторов магистральных сухопутных газопроводов Великобритании **UKOPA** (UNITED KINGDOM ONSHORE PIPELINE OPERATORS' ASSOCIATION);
- база данных Европейской ассоциации нефтяных компаний **CONCAWE** (Conservation of Clean Air and Water in Europe);
- база данных Бюро трубопроводной безопасности Управления по безопасности трубопроводов и опасным материалам Министерства транспорта США (Office of Pipeline Safety under the Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration – OPS **PHMSA**);
- база данных Национального энергетического управления Канады (National Energy Board – **NEB**);
- база данных Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (**Ростехнадзор**).

Основные характеристики магистральных трубопроводов, рассматриваемых в этих базах данных приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики магистральных трубопроводов (составлена авторами)

Базы данных	Объекты исследования	Материал трубопроводов	Транспортируемые вещества	Морские / континентальные	Типы нефтепроводов
EGIG	Только линейная часть	Сталь	Природный газ	континентальные	магистральные (с давлением > 15 бар)
UKOPA	Только линейная часть	Сталь, пластик, другие	В основном природный газ	континентальные	магистральные
CONCAWE	Линейная часть, а также насосные и промежуточные парк хранения	Сталь	Сырая нефть и нефтепродукты	континентальные	магистральные
PHMSA	Линейная часть, а также все площадочные объекты и любое оборудование	Сталь, пластик, другие	Природный газ, сырая нефть, нефтепродукты, опасные вещества, CO ₂ и др.	морские и континентальные	промысловые, магистральные, распределительные
NEB	Линейная часть, а также все площадочные объекты и любое оборудование	Сталь	Природный газ, нефть, нефтепродукты	в основном континентальные	магистральные и часть промысловых

Базы данных	Объекты исследования	Материал трубопроводов	Транспортируемые вещества	Морские / континентальные	Типы нефтепроводов
Ростехнадзор	Линейная часть, а также все площадочные объекты и любое оборудование	Сталь	Природный газ, нефть, нефтепродукты	морские и континентальные	магистральные, промысловые

Так как в рассматриваемых базах данных используются различные критерии наступления аварийной ситуации на трубопроводе, то в таблице 2 приведены используемые в этих базах данных критерии наступления аварийной ситуации на трубопроводе.

Таблица 2

Критерии наступления аварийной ситуации на трубопроводе в различных базах данных (составлена авторами)

Наименования БД	Критерии наступления аварийной ситуации на трубопроводе
EGIG	- все утечки газа независимо от объема.
UKOPA	- все утечки газа независимо от объема; - случаи дефектов и повреждений стенки трубопровода (не повлекшие, но могущие повлечь в дальнейшем разгерметизацию трубопровода).
CONCAWE	- утечки нефти и нефтепродуктов не менее 1 м ³ .
PHMSA	- наличие выброса высоко опасной жидкости свыше 5 баррелей (0,8 м ³) или других жидкостей свыше 50 баррелей (8 м ³); - оцененный ущерб превышает 50 000 долларов США; - наличие смертельно травмированных людей или получение травм, требующих госпитализации; - выброс вещества, сопровождающийся взрывом или пожаром.
NEB	- все утечки газа независимо от объема; - утечки нефти и нефтепродуктов не менее 1,5 м ³ ; - эксплуатация трубопровода с нарушением предельных проектных параметров, установленных законодательством.
Ростехнадзор	- объем утечки более 10 м ³ жидкости / более 10 000 м ³ газа; - смертельное травмирование / травмирование с потерей трудоспособности; - воспламенение опасной жидкости или взрыв ее паров / взрыв или воспламенение газа; - повреждение или разрушение других объектов; - загрязнение водных объектов.

Анализ информации в приведенных базах данных позволяет выделить и систематизировать причины наступления аварийных ситуаций на трубопроводах. В таблице 3 приведены причины наступления аварийных ситуаций на магистральных газопроводах на основе информации из баз данных UKOPA, EGIG, PHMSA, Ростехнадзора, а в таблице 4 приведены причины наступления аварийных ситуаций на нефте- и продуктопроводах по информации из баз данных CONCAWE, PHMSA, Ростехнадзора.

Таблица 3

**Причины наступления аварийных ситуаций на магистральных газопроводах
(составлена авторами)**

Наименования БД	Причины наступления аварийных ситуаций на магистральных газопроводах, и их доля в процентах от общего числа					
	внешнее воздействие	дефекты оборудования/материала	коррозия	природное воздействие	ошибочные действия персонала	другое
УКОРА	21	28	20	4	-	27
EGIG	50	16	15	7	5	7
PHMSA	25	19	23	10	2	21
Ростехнадзор	17	30	50	-	3	-

Таблица 4

**Причины наступления аварийных ситуаций на нефте- и продуктопроводах
(составлена авторами)**

Наименования БД	Причины наступления аварийных ситуаций на нефте- и продуктопроводах, и их доля в процентах от общего числа					
	внешнее воздействие	дефекты оборудования/материала	коррозия	природное воздействие	ошибочные действия персонала	другое
CONCAWE	37	25	28	3	7	-
PHMSA	23	20	23	4	7	23
Ростехнадзор	63	19	6	-	12	-

Среди природных воздействий, оказывающих влияние на аварийность трубопроводов можно особо выделить подвижки грунта, вызванные оползнями, пучениями грунта, а также вызванные сейсмическими воздействиями перемещения грунта, особенно в зонах активных тектонических разломов. При этом следует иметь ввиду, что с нашей точки зрения, внешнее воздействие, коррозия и природные воздействия относятся к причинам одной группы.

Анализ приведенной в базах данных информации показывает, что на частоту аварий трубопроводов, вызванных движением грунта, оказывает влияние диаметр трубопровода. На рисунке 2 приведены данные о частоте аварий, вызванных подвижками грунта, (в долях аварий на 1000 км протяженности трубопровода в год) в зависимости от диаметра трубопровода.

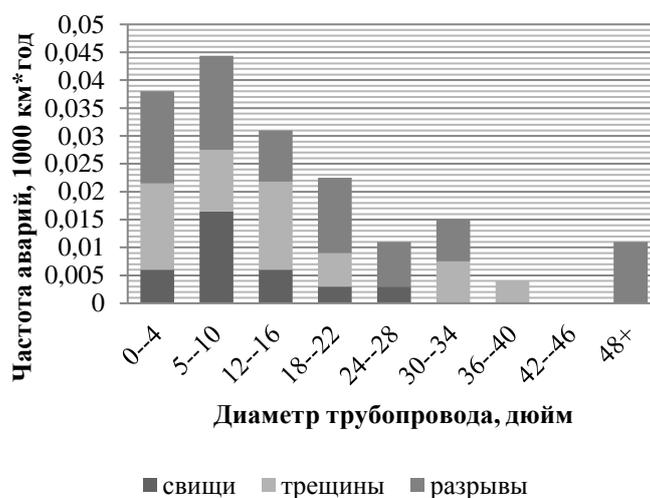


Рисунок 2. Влияние диаметра трубопровода на частоту аварий и размеры утечек, вызванных движением грунта [4]

С нашей точки зрения интересна проблема аварийности трубопроводов различного вида на территории Российской Федерации. В таблице 5 на основе информации из [5] приведены данные об аварийности различных типов трубопроводов в различные периоды времени на территории России.

Таблица 5

Статистика аварий на магистральных трубопроводах России за период с 2000 по 2015 гг. (составлена авторами)

Тип трубопровода	Количество аварий за рассматриваемый период			
	2000-2005 гг.	2006-2010 гг.	2011-2015 гг.	За весь период 2000-2015 гг.
Магистральный трубопровод (суммарные данные)	277	135	65	477
Магистральный газопровод	188	82	52	322
Магистральный нефтепровод	77	45	10	132
Магистральный нефтепродуктопровод	12	7	2	21
Аммиакопровод	0	1	1	2

С использованием данных из работы [5] построен график частот аварийных случаев на магистральных трубопроводах в период с 2000 по 2015 год, приведенный на рисунке 3.

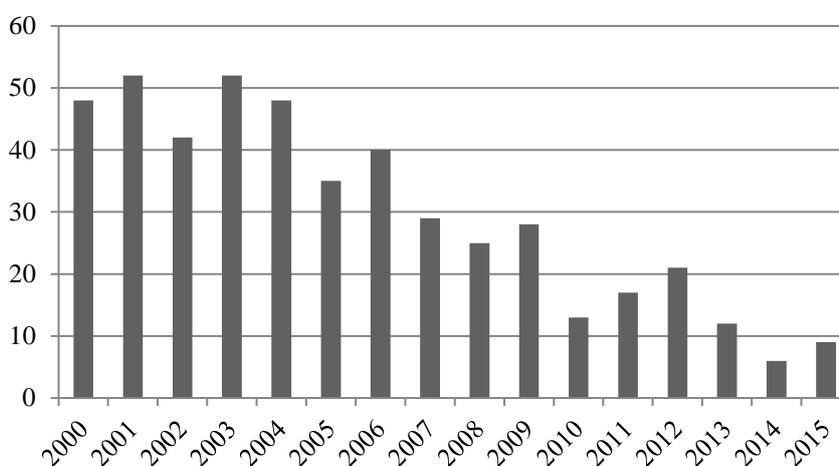


Рисунок 3. Кинетика аварийности магистральных трубопроводов за период с 2000 по 2015 гг. [5]

На основании анализа приведенных данных можно заключить, что с течением времени аварийность на магистральных трубопроводах уменьшается. Например, если в период с 2000-2005 гг. она составляла 277 случаев, то в период 2006-2010 гг. она составляла 135 случаев, а в период с 2011-2015 гг. в два раза меньше – 65 случаев.

В качестве основных причин аварийного выхода магистральных газопроводов из строя по данным Ростехнадзора можно отметить следующие: внешнее воздействие (17%), дефекты оборудования/материала (30%), коррозия (50%).

Поэтому при построении моделей деформирования трубопроводных конструкций следует учитывать возможность появления именно этих основных причин наступления аварийных состояний трубопроводов, и отражать их в расчетных схемах.

2. Обобщенная модель трубопроводной конструкции

Для прогнозирования поведения трубопровода необходимо построить обобщенную модель трубопроводной конструкции, учитывающую всю совокупность действующих факторов. К настоящему времени существует довольно большое количество моделей поведения трубопроводов, учитывающих те или иные факторы, действующие на трубопровод. Поэтому представляет интерес провести обзор и критический анализ этих моделей с целью оценки их применимости для описания различных состояний трубопровода и определения областей корректного применения.

Для проведения такого анализа в соответствии с подходом, предложенным Овчинниковым И.Г. [6, 7], будем рассматривать обобщенную модель трубопровода в виде совокупности следующих моделей:

- модель трубопровода, как конструктивного элемента (гибкая нить; длинный стержень - балка, работающая на изгиб; оболочка);
- модель материала трубопровода (упругий; нелинейно - упругий; упруго - пластический, с учетом ползучести);
- модель взаимодействия трубопровода с грунтом (модель деформирования грунта от подвижек трубопровода);
- модель нагружения трубопровода (статическое нагружение, динамическое нагружение - ударные нагружения; колебания трубопровода; сейсмическое воздействие);
- модель воздействия агрессивной рабочей среды;
- модель наступления предельного состояния (условие выхода трубопровода из эксплуатационного режима).

Такой подход к рассмотрению поведения трубопровода является реализацией подхода, когда трубопровод рассматривается как сложная система, состоящая из ряда подсистем (рис. 4).

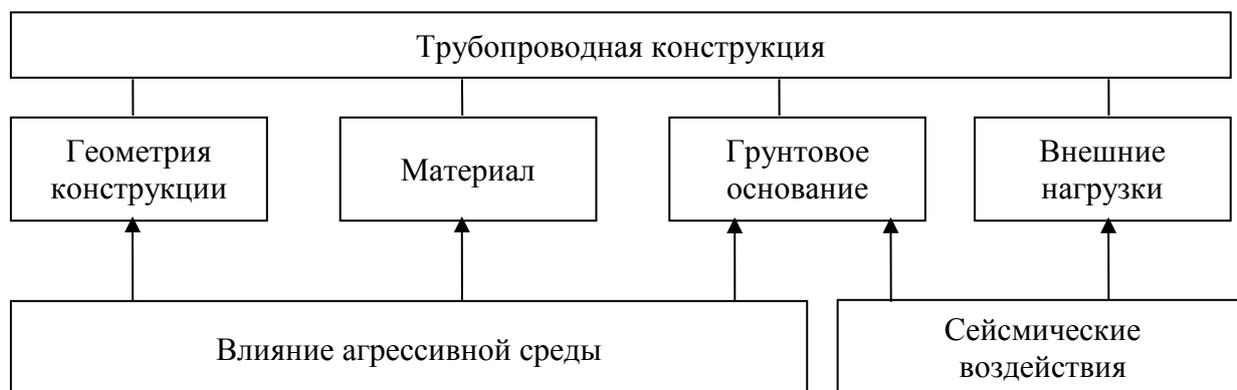


Рисунок 4. Влияние агрессивной среды и сейсмике на трубопроводную конструкцию (составлен авторами)

Далее рассмотрим существующие подходы к построению перечисленных групп моделей. Заметим, что в работе [8] рассматривается некоторый достаточно поверхностный обзор моделей трубопровода, но в ней упор делается на модели трубопровода как конструктивного элемента и модели взаимодействия трубопровода с грунтом, а также рассматривается применение метода конечных элементов к расчету трубопроводных конструкций.

2.1. Модель трубопровода, как конструктивного элемента

В качестве модели трубопровода, как конструктивного элемента может использоваться расчетная схема в виде гибкой нити, стержневого элемента, работающего на изгиб, оболочки вращения, работающей на изгиб, кручение.

2.1.1. Модель трубопровода как гибкой нити

На протяженном участке оценку напряженно-деформированного состояния трубопровода удобно производить при помощи модели нити. В её основе лежит предположение о большой величине прогиба оси трубопровода. В этом случае для оценки применимости модели нити производится сопоставление напряжений изгиба $\sigma_{изг}$ с напряжениями растяжения σ_n , возникающими от провисания нити. Область применимости модели нити определяется соотношением [6]:

$$\psi = \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_n} \quad (1)$$

При $\psi < 0,05$ используется модель гибкой нити, в которой не учитывается изгибная жесткость трубопровода, при $\psi > 0,05$ используется модель жесткой нити, в которой одновременно учитываются и напряжения изгиба, и напряжения растяжения. При очень больших значениях ψ , когда $\sigma_{изг} \gg \sigma_n$ используется модель стержня, работающего на изгиб (балки), дифференциальное уравнение которого имеет вид [6]:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} - \frac{H}{EI} \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{q}{EI} = 0, \quad (2)$$

где: y – прогиб балки, x – продольная координата, H – распор, EI – жесткость балки на изгиб (E – модуль упругости, I – момент инерции сечения), q – интенсивность внешней нагрузки.

Механике нитей посвящены работы Светлицкого В.А. [9], Щербакова В.П. [10], Меркина Д.Р. [11] и др. Применение модели нити к расчету трубопроводов рассматриваются в работах Казакевича М.И. [12], Абдельмасиха Бакосса Мусса [13], Петрова И.П., Спиридонова В.В. [14], Тартаковского Г.А. [15] и в других работах.

В работе [14] приведены различные конструкции надземных трубопроводов и их конструктивные схемы, рассмотрена методика их расчета по предельным состояниям и рекомендации по проектированию и строительству надземных систем трубопроводов. Также рассмотрен расчет трубопроводов, в качестве модели которых использована провисающая нить, произведено экспериментальное изучение на моделях трубопроводов.

Тартаковский Г.А. [15] также рассмотрел расчетную схему трубопроводов в виде провисающей нити, вывел соответствующие аналитические зависимости и расчетные формулы.

2.1.2. Модель трубопровода как стержневого элемента, работающего на изгиб

Модель трубопровода, как стержневого элемента, работающего на изгиб, может быть применена к решению следующих задач:

- задача кручения участка трубопровода в грунте;
- задача устойчивости продольно сжатого трубопровода;
- задача изгиба трубопровода под действием поперечной силы при надземной прокладке на опорах, при расчете трубопровода в зоне оползней и т.п.

Стержневые элементы, моделирующие протяженные магистральные трубопроводы, относят к типу тонких стержней, для которых соблюдается гипотеза плоских сечений. В общем случае стержень может быть криволинейным.

В случае плоской деформации при описании состояния стержня используется замкнутая система уравнений равновесия [16]:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx} - N \frac{d^2y}{dx^2} + q_\tau = 0; \\ T \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{dN}{dx} + q_n = 0; \\ M = EJ \frac{d^2y}{dx^2}; \\ \frac{dM}{dx} + m + N = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где: T, N - компоненты вектора внешних сил; q_τ, q_n - компоненты вектора распределенной нагрузки; M - момент инерции внешних сил; E - модуль Юнга; J - геометрический момент инерции сечения относительно оси изгиба; m - интенсивность приложенного к стержню момента внешних сил.

Механике стержней посвящены работы Жилина П.А. [17], Елисеева В.В. [18], Масленникова А.М. [19], Лалина В.В. [20], Попова Е.П. [21, 22], Светлицкого В.А. [9] и др.

Применение расчетной схемы в виде стержневого элемента к расчету трубопроводов рассматривается в работах Светлицкого В.А. [23], Шаммазова А.М., Зарипова Р.М., Чичелова В.А., Коробкова Г.Е. [24], Масалимова Р.Б., Зарипова Р.М. [25] и других исследованиях.

В работе Светлицкого В.А. [23] изложены теория и методы решения задач статики и динамики стержней, взаимодействующих с потоком жидкости или воздуха, методы решения нелинейных уравнений равновесия абсолютно гибких стержней в потоке и методы решения уравнений малых колебаний стержней, взаимодействующих с потоком. Рассмотрены задачи взаимодействия стержней с внешним потоком и внутренним (трубопроводы и шланги), параметрические колебания шлангов, вызванные пульсацией давления в жидкости и пульсацией скорости потока.

Шаммазов А.М., Зарипов Р.М., Чичелов В.А., Коробков Г.Е. [24] разработали нелинейную теорию деформирования трубопровода как изгибаемого стержня, провели сопоставление аналитических и численных методов расчета напряженно-деформированного состояния трубопроводов, подвергающихся действию нагрузок эксплуатационного и природно-климатического характера, пересекающих участки с неоднородными грунтами. При построении своей теории авторам удалось не вводить дополнительные гипотезы об особенностях конструкции трубопровода и неизменности величины продольного усилия, по длине трубопровода.

Масалимовым Р.Б. и Зариповым Р.М. [25] получено уравнение деформирования трубопровода, составленного из выпуклых и вогнутых вставок постоянной кривизны. Правда при этом не учитывалось взаимодействие изогнутого трубопровода с грунтом. В работе рассмотрен пример расчета и проведен анализ полученных результатов.

В процессе эксплуатации нефте- и газопроводы подвергаются различного рода динамическим воздействиям и вибрациям, вызванным работой компрессорных станций, вследствие которых возникают колебательные процессы. Спектр колебаний представляет собой сложный комплекс взаимодействия собственных и вынужденных частот, определение которых, зависит от геометрических и механических характеристик трубопроводов [26].

Динамика трубопроводов является предметом широких исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Эти исследования отражены в работах Болотина В.В. [27, 28], Вайнберга Д.В. [29], Гастева В.А. [30], Гольденבלата И.И. [31], Ишемгужина И.Е. [32], Ильина В.П. [33], Лалина В.В. [34], Ониашвили О.Д. [35], Тимошенко С.П. [36], Арнольда Р.Н. [37], Кани Х.Х. [38], Чена Х. [39], Джонджорова П. [40], Пайдосиса М.П. [41], Вивера Д.С. [42] и касаются колебаний и устойчивости прямолинейных труб.

2.1.3. Модель трубопровода как оболочечной системы

Расчет подземных трубопроводов с помощью моделей нити и стержня довольно широко применяется, так как трубопроводы имеют большую протяженность по сравнению с размерами сечений. Но эти модели не позволяют учесть различные эффекты деформирования трубопроводов в процессе эксплуатации, развивающиеся в стенке трубопровода, поэтому для исследования нарушений круговой формы поперечного сечения, трубопровод моделируется тонкой цилиндрической оболочкой [16].

При выводе уравнений деформирования тонкой оболочки, моделирующей поведение трубопровода, вводятся следующие предположения [6]:

- малость толщины оболочки по сравнению с диаметром и тем более длиной. Эта гипотеза позволяет применять полученные уравнения при соотношениях:

$$\frac{R}{h} \geq 30, \quad (4)$$

где: h - толщина стенки оболочки, R - минимальный радиус оболочки. Применяемые в нашей стране трубы полностью удовлетворяют этому условию.

- гипотезы недеформируемой нормали, или, другими словами, Кирхгофа-Лява, позволяющие свести задачу о деформировании оболочки к рассмотрению деформирования срединной поверхности оболочки. Для трубопроводов, находящихся в проектном положении, гипотезы Кирхгофа – Лява справедливы в большинстве случаев.
- малость величины прогибов оболочки по отношению к ее толщине. Для трубопроводов, находящихся в проектном положении эта гипотеза также обычно выполняется.

Также в отдельных случаях могут вводиться дополнительные гипотезы:

- гипотеза о замкнутости контура оболочки, которая в случае трубопроводов может нарушаться только в случае наступления аварийного состояния;

- гипотеза о круговой (осесимметричной) форме сечения оболочки, которая в случае трубопроводов обеспечивается за счет малых допусков на овализацию поперечного сечения.

Теории оболочек, используемые в случаях простого напряженного состояния в оболочке [6]:

1. Теория безмоментного состояния, предполагающая пренебрежимую малость всех моментов и поперечных сил. Применение этой гипотезы к модели замкнутой осесимметричной цилиндрической оболочки дает так называемую «котельную» формулу:

$$\sigma = \rho \frac{R}{h} \quad (5)$$

Можно полагать, что линейная часть подземного трубопровода в случае его проектного положения находится практически в безмоментном состоянии. При наличии неprojektных воздействий состояние трубопровода как цилиндрической оболочки является моментным в окрестности района воздействий. На достаточном удалении от моментных зон напряженное состояние трубопровода может рассматриваться как безмоментное.

2. Полубезмоментная теория оболочек Власова В.З., в которой пренебрегаются величинами изгибающего и крутящего момента, а также поперечной силы в поперечных сечениях оболочки. При этом изгибающие моменты в продольных сечениях оболочки учитываются. Согласно полубезмоментной теории оболочек, система линеаризованных уравнений движения (6) и система уравнений для изгибающих моментов (7) определяют напряженно - деформированное состояние оболочки [19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + p_x + \rho h g_x; \\ \rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial x} + p_y + \rho h g_y; \\ \rho h \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + k_x N_x + k_y N_y + p_z + \rho h g_z, \end{array} \right. \quad (6)$$

где: p_x, p_y, p_z – компоненты вектора поверхностных сил; g_x, g_y, g_z – компоненты вектора массовых сил; ρ – плотность материала оболочки; h – толщина оболочки; T, N_x, N_y – цепные усилия, действующие в срединной поверхности оболочки; u, v, ω – компоненты вектора перемещений точек срединной поверхности; k_x, k_y – компоненты кривизны срединной поверхности; M_x, M_y – компоненты вектора изгибающего момента; H – крутящий момент.

В случае линейно-упругого материала усилия в сечениях оболочки могут быть выражены через перемещения с помощью следующих формул:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_x = \frac{hE}{(1-\nu^2)} \left[\frac{\partial u}{\partial x} - k_x w + \nu \left(\frac{\partial v}{\partial y} - k_y w \right) \right]; \\ N_y = \frac{hE}{(1-\nu^2)} \left[\frac{\partial u}{\partial y} - k_y w + \nu \left(\frac{\partial v}{\partial x} - k_x w \right) \right]; \\ T = \frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \\ M_x = M_y = \frac{h^3 E}{12(1-\nu)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \\ H = -\frac{h^3 E}{12(1+\nu)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \end{array} \right. \quad (7)$$

где: E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Рассмотрению различных аспектов теории оболочек посвящены работы Жилина П.А. [17], Карпова В.В. [43], Лурье А.И. [44], Муштари Х.М., Галимова К.З. [45], Новожилова В.В. и др. [46], Тимошенко С.П., Войновского-Кригера С. [47], Филина А.П. [48] и другие работы.

Применению теории оболочек к расчету трубопроводных конструкций посвящена работа Рудаченко А.В., Саруева А.Л. [49], в которой рассматриваются особенности прочностных расчетов магистральных нефтепроводов, а также численный анализ прочности трубопроводов. Также изложены основные положения теории тонких упругих оболочек применительно к расчету резервуаров и трубопроводов. В работе Осокина И.А. [50], анализируются методы расчета тонкостенных гофрированных водопропускных труб. И предлагается методика расчетного анализа гофрированных металлических водопропускных труб, основанная на адаптации теории гладких цилиндрических оболочек к задаче расчета гофрированных цилиндрических оболочек.

Для анализа колебаний цилиндрических оболочек иногда используются уравнения Флюгге В. [51], записанные в виде трех дифференциальных уравнений движения относительно трех перемещений. В случае оболочки с шарнирно закрепленными концами применение тригонометрических рядов Фурье позволяет получить кубическое уравнение для нахождения квадрата круговой частоты свободных изгибных колебаний цилиндрической оболочки:

$$\alpha_3 \omega^6 + \alpha_2 \omega^4 + \alpha_1 \omega^2 + \alpha_0 = 0 \quad (8)$$

Однако, ввиду громоздкости получаемых решений, эти уравнения на практике используются редко. Практически приемлемые уравнения были получены Власовым В.З. [52], Муштари Х.М. [45], Доннелом Л.Х. [53], эти уравнения широко известны как уравнения теории пологих оболочек [52, 45, 53]. При использовании этих уравнений значения собственных частот колебаний оболочки получаются существенно завышенными, так как не учитываются тангенциальные составляющие сил инерции, причем Иванютой Э.И. и Финкельштейном Р.Н. [54] показано, что отличие может составлять 25%.

В работах Кукуджанова С.Н. [55, 56, 57] и других исследовалось влияние внутреннего рабочего давления в оболочке трубопровода на частоты свободных колебаний цилиндрических оболочек. Полученное им выражение для квадрата частоты свободных колебаний имеет вид:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{Egh_v^2}{\gamma R^2} \frac{m^4(m^2-1)(m^2-1+p^*) + \alpha_n^4/h_v^2}{m^2(m^2+1)}, \quad (9)$$

где: $h_v = \frac{h}{R\sqrt{12(1-v^2)}}$, $p^* = 12(1-v^2)\frac{p}{E}\left(\frac{R}{h}\right)$, $a_n = \frac{n\pi R}{1}$, p^* -нормальное внутреннее давление, γ - удельный вес материала трубы, g - ускорение свободного падения, m , n - волновое число в окружном и продольном направлении, R -радиус срединной поверхности.

Дальнейшие исследования в области определения частот свободных колебаний трубопроводов с позиции теории цилиндрических оболочек были выполнены с использованием полубезмоментной теории оболочек, предложенной Власовым В.З. [52, 58], и дающей хорошие результаты для случая оболочек средней длины и длинных, к которым и могут быть отнесены практически все трубопроводы. Разрешающие уравнения движения в этом случае представляют собой систему дифференциальных уравнений 4-го порядка, что позволяет формулировать по два граничных условия на каждом из двух концов закрепления. Ильиным В.П., Халецкой О.Б. [59, 60] с использованием геометрически нелинейной полубезмоментной теории оболочек Власова – Новожилова [61, 52, 58] было получено наиболее полное решение задачи о свободных колебаниях трубопроводов при учете влияния внутреннего рабочего давления, а также всех компонентов сил инерции в продольном, окружном, и радиальном направлении. В случае трубопровода с шарнирным опиранием по концам получено следующее выражение для частоты свободных колебаний:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{Egh_v^2 \lambda_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 \pm p^*)}{\gamma R^2 (\lambda_n^2 h_v + m^4 + m^2)}, \quad (10)$$

где $\lambda_n = \frac{n\pi R}{l\sqrt{h_v}}$, $p^* = \frac{pR}{Ehh_v^2}$, $h_v = \frac{h}{R\sqrt{12(1-v^2)}}$

Знак плюс в числителе (10) у параметра p^* , соответствует внутреннему давлению, знак минус – внешнему. Отличие этой формулы от (9) состоит в том, что здесь учтены все силы инерции, включая тангенциальные $\lambda_n^2 h_v$.

2.2. Модель материала трубопровода

2.2.1. Поведение материала при кратковременном нагружении

Раньше при расчете трубопроводов использовалась линейная зависимость напряжений от деформаций, записываемая в форме обобщенного закона Гука. Однако в последнее время наметилась тенденция использовать при прочностных расчетах нелинейную зависимость напряжений от деформаций. Так как в ряде работ Клока Б.А. [62], Наумовой Г.А., Овчинникова И.Г. [6] отмечается, что легированные стали, используемые для изготовления трубопровода, обычно не имеют площадки текучести, и поэтому для них используют схематизированную диаграмму деформирования в виде двух прямых (рис. 5).

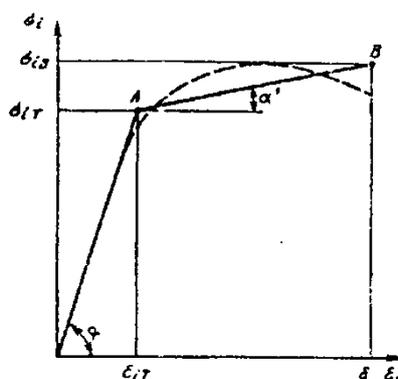


Рисунок 5. Схематизация нелинейной диаграммы деформирования двухзвенной ломаной (составлен авторами)

Также существует ряд исследований Наумовой Г.А. и Овчинникова И.Г. [63], в которых для аппроксимации нелинейных диаграмм деформирования используются различные функции, например, кубическая, в виде

$$\sigma = A\varepsilon - B\varepsilon^3, \quad (11)$$

в которой: σ – напряжение, ε – деформация, A и B – коэффициенты, определяемые из условия наилучшего описания экспериментальных данных кубической зависимостью. Достоинством модели (11) является то, что коэффициенты A и B входят в нее линейно, и потому их определение сводится к решению простых уравнений.

Также находит применение степенная аппроксимация зависимости $\sigma_i(\varepsilon_i)$ в виде

$$\sigma_i = A(\varepsilon_i)^m \quad (12)$$

Параметры A и m , которые определяются по формулам

$$m = \varepsilon_p \quad (13)$$

$$A = \sigma_b e^{m\varepsilon_p - m^2} \quad (14)$$

где: ε_p – равномерная логарифмическая деформация при одноосном растяжении, σ_i и ε_i – соответственно интенсивность напряжений и деформаций.

Однако, как отмечается в работе Ланчакова Г.А. [64] степенная функция с большой погрешностью аппроксимирует поведение материалов при малых пластических деформациях и не различает материалы, имеющие разные пределы текучести при одинаковых значениях временного сопротивления σ_b и логарифмической деформации ε_p . Например, модель (12), коэффициенты которой определены по формулам (13) и (14) аппроксимирует диаграммы деформирования распространенных трубных сталей 17ГС, 14ХГС, 15Г2С и 18ХГ2СФ с значительной погрешностью. Поэтому в работе [64] для аппроксимации зависимости $\sigma_i(\varepsilon_i)$ предложено использовать показательную функцию

$$\sigma_i = \sigma_b e^{\varepsilon_p} \left(1 + m_1 - m_1 e^{\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_i}{m_1}} \right) \quad (15)$$

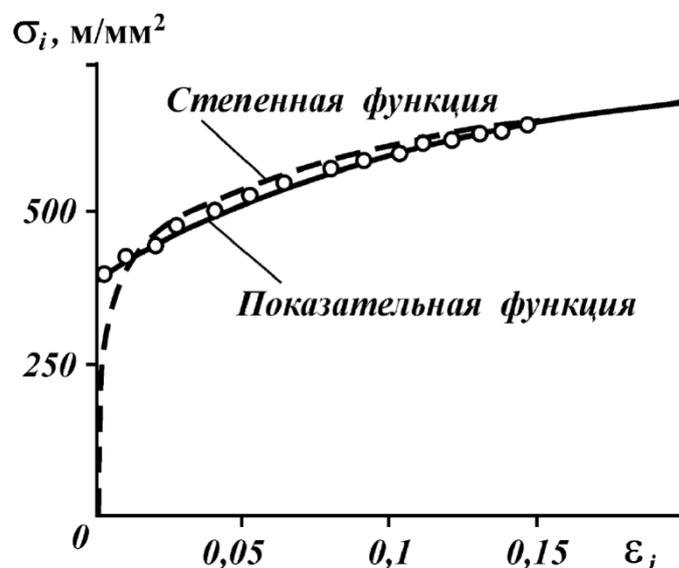


Рисунок 6. Сравнение разных моделей, примененных для аппроксимации экспериментальной кривой деформирования [6]

Здесь m_1 – коэффициент, определяемый по методике работы [64]. На рисунке 6 приведен пример аппроксимации экспериментальной кривой деформирования (показана точками) степенной моделью (12) и показательной моделью (15), откуда видно, что показательная модель лучше аппроксимирует экспериментальные данные.

2.2.2. Влияние времени эксплуатации на механические свойства трубных сталей

При выполнении прочностных расчетов трубопроводов с целью оценки изменения их напряженно-деформированного состояния с течением времени под влиянием различных факторов представляет интерес анализ изменения свойств сталей с течением времени. Такие эксперименты описаны в работе Ланчакова Г.А. [64].

В процессе экспериментальных исследований изучались образцы труб, взятых с 19 магистральных трубопроводов, расположенных в районах с различными климатическими условиями. Размеры взятых образцов были следующими: диаметр труб в пределах от 425 до 1220 мм, а толщина стенок находилась в пределах 7-15,5 мм. Срок службы образцов труб находился в пределах от 4 до 44 лет. В результате проведенных испытаний был получен ряд характеристик, которые сравнивались как с характеристиками металла труб аварийного запаса, так и с характеристиками металла только что выпущенных труб Орско-Халиловского металлургического комбината.

Анализ результатов испытаний позволяет заключить, что предел прочности, предел текучести и пластичность металла с течением времени эксплуатации практически не изменяются. Интересно, что и механические свойства сварных соединений также практически не изменяются с течением времени. Следовательно, стандартные механические характеристики металла трубных сталей (предел прочности, предел текучести и пластичность металла) практически нечувствительны к происходящим в металле в процессе эксплуатации структурным изменениям.

Однако проведенные испытания на статический и динамический изгиб образцов с надрезом позволили обнаружить, что значение ударной вязкости КСЧ при -40°C и КСВ при $+20^{\circ}\text{C}$ снизилось на 30-40% после 20-25 лет эксплуатации. Кроме того, после длительной эксплуатации в металле труб обнаружено смещение порога хладноломкости из области отрицательных температур в область положительных, то есть определенное охрупчивание металла, что приведет к распространению трещин в трубах по хрупкому сценарию даже при положительных температурах. После 25 лет эксплуатации наблюдается значительное снижение характеристик сопротивляемости металла труб разрушению при статическом испытании на изгиб образцов с острым надрезом, что характеризует увеличение чувствительности стали к концентраторам напряжений.

Следовательно, хотя после длительной эксплуатации и не происходит изменения стандартных механических характеристик металла, но имеет место снижение сопротивления хрупкому разрушению под влиянием накопления дефектов в результате совместного действия напряжений, коррозионной среды и водорода.

2.2.3. Особенности моделирования влияния дефектов и повреждений трубных сталей

Как показывает анализ результатов исследований [6], в металле труб могут появиться пластические деформации, может иметь место изменение некоторых механических и прочностных свойств, в частности, охрупчивание, а также нарушение сплошности металла вследствие растрескивания.

При моделировании поведения металла, подверженного пластическим деформациям могут использоваться вышеприведенные модели деформирования: кубическая, степенная, показательная. В зависимости от вида аппроксимирующей диаграмму деформирования функции удастся получить достаточно простые модели деформирования трубопровода в аналитическом виде. Особенно это удастся при использовании кубической аппроксимации диаграммы деформирования. Если же поведение трубопровода моделируется с использованием численных методов или разработанных конечно-элементных программных комплексов, то проблема сложности аппроксимации диаграммы деформирования не играет практически никакой роли и на первый план выступает точность аппроксимации. Мало того, в современных программных комплексах, предназначенных для решения подобного рода задач, зачастую используется только полилинейная аппроксимация кривой деформирования, позволяющая описывать эту кривую с любой необходимой степенью приближения.

Охрупчивание материала с его последующим растрескиванием, а также влияние коррозионных сред пока не рассматривается, но их анализу применительно к трубопроводным конструкциям посвящены исследования [65, 66, 67, 68].

Заключение

В данной статье, представляющей собой первую часть серии статей рассмотрена проблема построения обобщенной модели трубопровода в виде совокупности моделей: модель трубопровода, как конструктивного элемента; модели материала трубопровода; модели взаимодействия трубопровода с грунтом; модели нагружения трубопровода; модели воздействия агрессивной рабочей среды; модели наступления предельного состояния. Сначала в работе кратко проанализирована проблема аварийности трубопроводных систем и причин, приводящих к появлению аварий. На основе анализа этих причин и сформулированы требования к обобщенной модели трубопровода. Далее рассмотрены модели трубопровода как конструктивного элемента и модели материала трубопровода. В последующих частях будут рассмотрены и остальные составляющие обобщенной модели трубопровода (модели взаимодействия трубопровода с грунтом; модели нагружения трубопровода; модели воздействия агрессивной рабочей среды; модели наступления предельного состояния).

ЛИТЕРАТУРА

1. Петов, Н. Разливанное море разливов / Н. Петов // Нефть России. - 2010. - №5. - С. 77-80.
2. Окамото, Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений / Ш. Окамото-М.: Стройиздат, 1980. - 342 с.
3. Кобылянский, Ю.Г. Механизмы влияния разломов на аварийность на трубопроводах // Ю.Г. Кобылянский, С.В. Цирель // Георесурсы, геознергетика, геополитика - 2010. - №2. - 5 с.
4. Савина, А.В. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта / А.В. Савина [и др.] // Безопасность труда в промышленности. - 2010. - №7. - С. 16 - 22.
5. Новиков, П.А. Выявление опасных участков магистральных нефтепроводов на основе долгосрочного прогнозирования ореола оттаивания многолетнемерзлых грунтов: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Уфа, 2016. - 24 с.

6. Наумова, Г.А. Расчет трубопроводных конструкций с эксплуатационными повреждениями / Г.А. Наумова [и др.] - Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2009. - 184 с.
7. Овчинников, И.Г. О методологии построения моделей конструкций взаимодействующих с агрессивными средами / И.Г. Овчинников // Долговечность материалов и элементов конструкций в агрессивных и высокотемпературных средах. - Саратов, 1988.
8. Яваров, А.В. Напряженно - деформированное состояние подземных трубопроводов / А.В. Яваров [и др.] // интернет - журнал «Строительство уникальных зданий и сооружений». - 2013. - №1 (6).
9. Светлицкий, В.А. Механика гибких стержней и нитей / В.А. Светлицкий - М.: Изд-во Машиностроение, 1978. - 222 с.
10. Щербаков, В.П. Прикладная механика нити / В.П. Щербаков - М.: Изд-во РИО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001. - 301 с.
11. Меркин, Д.Р. Введение в механику гибкой нити / Д.Р. Меркин - М.: Наука, 1980. - 240 с.
12. Казакевич, М.И. Аэродинамическая устойчивость надземных и висячих трубопроводов / М.И. Казакевич - М.: "Недра", 1977. - 200 с.
13. Абдельмасих, Бакосс Мусса. Висячие системы надземной прокладки трубопроводов: Дис. канд. техн. наук. - К., 1990.-133 с.
14. Петров, И.П. Надземная прокладка трубопроводов / И.П. Петров, В.В. Спиридонов, - 1965. - 447 с.
15. Тартаковский, Г.А. Строительная механика трубопроводов / Г.А. Тартаковский. - Москва: Недра, 1967. - 312 с.
16. Булдаков, Е.Л. Методика расчета несущей способности магистрального нефтепровода, проложенного в скальных грунтах, под воздействием сейсмозрывных волн: Дис. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2015.-105 с.
17. Прикладная механика. Теория тонких упругих стержней: учебное пособие / П.А. Жилин. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. - 100 с.
18. Елисеев, В.В. Механика упругих стержней / В.В. Елисеев - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1994. - 84 с.
19. Основы динамики и устойчивости стержневых систем: учебное пособие / А.М. Масленников. - М.: Изд-во АСВ, 2000. - 204 с.
20. Лалин, В.В. Динамическое поведение бесконечных стержневых элементов на упруго-вязком основании под действием точечного источника возмущения / В.В. Лалин, Г.В. Денисов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. - 2013. - №2 (30). - С. 105 - 113.
21. Попов, Е.П. Нелинейные задачи статики тонких стержней / Е.П. Попов - М.: Изд-во ОГИЗ, 1948. - 170 с.
22. Попов, Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней / Е.П. Попов - М.: Изд-во Наука, 1986. - 296 с.
23. Светлицкий, В.А. Механика трубопроводов и шлангов / В.А. Светлицкий - М.: Машиностроение, 1982. - 279 с.

24. Шаммазов, А.М. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. Том 1. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов / А.М. Шаммазов [и др.] - М.: Интер, 2005. - 706 с.
25. Масалимов, Р.Б. Использование уравнений изгиба стержня для исследования напряженно - деформированного состояния и устойчивости трубопровода с кривыми вставками / Р.Б. Масалимов, Р.М. Зарипов // интернет-журнал «Нефтегазовое дело». - 2011. - №1.
26. Разов, И.О. Аналитические методы расчета динамических характеристик прямолинейных тонкостенных трубопроводов большого диаметра при наземной прокладке: Дис. канд. техн. наук. – Тюмень, 2015. - 130 с.
27. Болотин, В.В. Вибрации в технике: монография / под общ. ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. - 352 с.
28. Болотин, В.В. Динамическая устойчивость упругих систем / В.В. Болотин. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1956. - 600 с.
29. Вайнберг, Д.В. Механические колебания и их роль в технике / Д.В. Вайнберг, Г.С. Писаренко. – М.: Наука, 1965. - 276 с.
30. Гастев, В.А. Поперечные колебания и устойчивость стержней при действии периодически повторяющихся продольных импульсов / В.А. Гастев // Труды Ленинградского института авиаприборостроения, 1949, вып. 1.
31. Гольденблат, И.И. Некоторые вопросы колебаний и динамической устойчивости упругих систем / И.И. Гольденблат // сб. статей. Исследовательские работы по инженерным конструкциям. - Стройиздат, 1948. - С. 4 - 12.
32. Ишемгужин, И.Е. Демпфирование параметрических колебаний трубопровода / И.Е. Ишемгужин [и др.] // интернет-журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. - №3. - С. 84 – 93.
33. Ильин, В.П. Исследование параметрического резонанса в трубопроводах, содержащих пульсирующий поток жидкости / В.П. Ильин, В.Г. Соколов // Вопросы механики строительных конструкций и материалов. Межвузовский тематический сборник. – Л., 1987. - С. 6 - 10.
34. Лалин, В.В. Различные формы уравнений нелинейной динамики упругих стержней // Труды СПбГПУ № 489. (Механика материалов и прочность конструкций). СПб.: Изд-во СПбГПУ. - 2004. - С. 121-128.
35. Ониашвили, О.Д. Некоторые динамические задачи теории оболочек / О.Д. Ониашвили. – М.: Изд. АН СССР, 1957. - 195 с.
36. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1967. - 444 с.
37. Arnold, R.N. Flexural vibration of the walls of thin cylindrical shells having free supported ends / R.N. Arnold, G.B. Warburton // Proc. Of the Roy. Soc. Of London. – 1949. – Ser A, Vol. 197.
38. Chany, H.H. On the flexural vibrations of a pipeline containing flowing fluid / H.H. Chany, T.W. India // Proc. Theoret. and Appl. Mech. India. – 1957. – P. 254.
39. Chen, H. Vibration of a Pipeline Containing Fluid Flow with Elastic Support / Chen, H. // M. Sc. Thesis, Ohio University. – 1991. – P. 61.

40. Djondjorov, P. Dynamic stability of fluid conveying cantilevered pipes on elastic foundations / Djondjorov, P., Vassilev, V., and Dzhupanov // Journal of Sound and Vibration. – 2001. Vol. 247(3) – P. 537 – 546.
41. Paidoussis, M.P. Dynamic stability of pipes conveying fluid / M.P. Paidoussis, N.T. Issid // Journ. of sound and vibr. – 1974. – 33 (3). – P. 264 – 294.
42. Weaver, D.S. On the dynamic stability of fluid conveying pipes / D.S. Weaver, T.E. Unny // Journ. Appl. Mech. – 1973. – Vol.40. – P. 51 – 54.
43. Карпов, В.В. Геометрически нелинейные задачи для пластин и оболочек и методы их решения / В.В. Карпов. – М.: Изд-во АСВ, 1999. - 154 с.
44. Лурье, А.И. Статика тонкостенных упругих оболочек / А.И. Лурье. - М.: Изд-во Гостехиздат, 1947. - 252 с.
45. Муштари, Х.М. Нелинейная теория упругих оболочек / Х.М. Муштари, К.З. Галимов. - Казань: Таткнигиздат, 1957. – 520 с.
46. Новожилов, В.В. Линейная теория тонких оболочек / В.В. Новожилов. - Л.: Изд-во Политехника, 1991. - 656 с.
47. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. - М.: Изд-во Физматгиз, 1963. - 636 с.
48. Филин, А.П. Элементы теории оболочек / А.П. Филин. - Л.: Изд-во Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. - 384 с.
49. Рудаченко, А.В. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов / А.В. Рудаченко, А.Л. Саруев; Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. - 136 с.
50. Осокин, И.А. Применение теории оболочек вращения к расчету гофрированных водопропускных труб / И.А. Осокин // интернет-журнал «Науковедение». – 2013. - №2.
51. Флюгге, В. Статика и динамика оболочек / В. Флюгге. – М.: Госстройиздат, 1961. - 306 с.
52. Власов, В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике / В.З. Власов. - М.:Гостехиздат, 1949. - 784 с.
53. Donnel, L.H. A new theory for the buckling of thin cylinders under axial elastic foundations / Djondjorov, P., Vassilev, V., and Dzhupanov // Journal of Sound and Vibration. - 2001. Vol. 247 (3) - P. 537 - 546.
54. Иванюта, Э.И. О влиянии тангенциальных сил инерции на величину частоты свободных колебаний тонкой цилиндрической оболочки / Э.И. Иванюта, Р.М. Финкельштейн // Исследования по упругости и пластичности. – Л.: ЛГУ, 1963. вып.2 - С. 212 - 215.
55. Кукуджанов, С.Н. Колебания и динамическая устойчивость оболочек вращения, близких к цилиндрическим, находящихся под действием нормального давления и меридиональных усилий / С.Н. Кукуджанов // Изв. РАН, МТТ. - 2006. - №2. - С. 48 - 59.

56. Кукуджанов, С.Н. О влиянии нормального давления на частоты собственных колебаний цилиндрических оболочек / С.Н. Кукуджанов // Механика твердого тела, 1968. - №3. - С. 14 - 20.
57. Кукуджанов, С.Н. О влиянии нормального давления на частоты собственных колебаний оболочек вращения, близких к цилиндрическим / С.Н. Кукуджанов // Изв. РАН, МТГ. - 1996. - №6. - С. 121–126.
58. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек / В.В. Новожилов. – Л.: Судпрогаз, 1962. - 430 с.
59. Ильин, В.П. О применении полубезмоментной теории к определению частот свободных колебаний круговой цилиндрической оболочки / В.П. Ильин, О.Б. Халецкая // Всб.: Исследования по расчету строительных конструкций // Труды ЛИСИ, - 1974. - №89. - С. 49 - 60.
60. Ильин, В.П. Применение полубезмоментной теории к задачам расчета тонкостенных труб // Всб.: Проблемы расчета пространственных конструкций // Труды МИСИ. - М.: 1980. - С. 45 - 55.
61. Аксельрад, Э.Л. Расчет трубопроводов / Э.Л. Аксельрад, В.П. Ильин. – Л.: Машиностроение, 1972. - 240 с.
62. Клок, Б.А. Прочность и ремонт магистральных трубопроводов в Западной Сибири / Б.А. Клок [и др.] – М.: Машиностроение, 1994. - 120 с.
63. Наумова, Г.А. Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций / Г.А. Наумова, И.Г. Овчинников. – Саратов: СГТУ, 2000. - 227 с.
64. Ланчаков, Г.А. Работоспособность трубопроводов. В 3-х ч. Ч. 2. Сопrotивляемость разрушению / Г.А. Ланчаков [и др.] - 2001. - 350 с.
65. Кабанин, В.В. Моделирование коррозионного растрескивания оболочечных конструкций / В.В. Кабанин [и др.] - Саратов. Изд-во СГУ, 2006. - 124 с.
66. Кабанин, В.В. Прочность оболочек вращения, подвергающихся коррозионному износу в неоднородном поле температур / В.В. Кабанин [и др.] - Волгогр. гос. архит. – строит. ун-т. Волгоград. Изд – во ВолгГАСУ, 2007. - 108 с.
67. Овчинников, И.И. Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами / И.И. Овчинников, Г.А. Наумова - Волгогр. гос. архит. – строит. ун-т. Волгоград. Изд – во ВолгГАСУ, 2007. - 272 с.
68. Овчинников, И.И. Идентификация и верификация моделей коррозионных и деформационных процессов / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников - Саратов: СГТУ, 2014. - 164 с.

Ovchinnikov Igor Georgievich

Penza state university of architecture and construction, Russia, Penza
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Perm national research polytechnic university, Russia, Perm
E-mail: bridgesar@mail.ru

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Moscow state automobile & road technical university
Sochi branch, Russia, Sochi
E-mail: bridgeart@mail.ru

Bashirzade Samir Rafail ogly

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
E-mail: s.bashirzade2010@yandex.ru

Predicting the behavior of pipeline structures in complex soil and geological conditions. Part 1. A generalized deformation model of the pipeline

Abstract. The present article describes the problem of constructing a generalized model of the pipeline. A generalized model of the pipeline is a combination of the models: a model of the pipeline as a structural element; a material model of the pipeline; a model of interaction between pipeline and soils; a model of pipeline loading; a model of the aggressive environment effects; a model of the occurrence of the limit state. This paper represents the first part of a series of articles. The issue of the accident rate of pipeline systems and accident causes are considered. For example, according to Rostekhnadzor the main reasons of the accident rate of gas pipelines are: the external impact (17%), equipment/material defects (30%) and corrosion (50%). The main reasons of the accident rate of pipelines should be considered in deformation models of pipelines and reflected in design schemes.

Based on the analysis of these causes the requirements for a generalized model of the pipeline were formulated. Further considered the model of the pipeline as a structural element (the pipeline as a flexible string; pipeline as a long bar-beam working in bending; pipeline as a shell); and a material model of the pipeline (nonlinear stress-strain diagram, the change of material properties over time). In the subsequent parts other components of the generalized model of the pipeline (a model of interaction between pipeline and soils; a model of pipeline loading; a model of the aggressive environment effects; a model of the occurrence of the limit state) will be considered.

Keywords: generalized model of pipeline; accident condition; structural element model; pipeline string; bar; shell; material model

REFERENCES

1. Petov, N. Razlivannoe more razlivov / N. Petov // Neft' Rossii. - 2010. - №5. - С. 77-80.
2. Okamoto, Sh. Seysmostoykost' inzhenernykh sooruzheniy / Sh. Okamoto-M.: Stroyizdat, 1980. - 342 s.
3. Kobylyanskiy, Yu.G. Mekhanizmy vliyaniya razlomov na avariynost' na truboprovodakh // Yu.G. Kobylyanskiy, S.V. Tsirel' // Georesursy, geoenergetika, geopolitika - 2010. - №2. - 5 s.

4. Savina, A.V. Analiz rossiyskikh i zarubezhnykh dannykh po avariynosti na ob'ektakh truboprovodnogo transporta / A.V. Savina [i dr.] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. - 2010. - №7. - S. 16 - 22.
5. Novikov, P.A. Vyyavlenie opasnykh uchastkov magistral'nykh nefteprovodov na osnove dolgosrochnogo prognozirovaniya oreola ottaivaniya mnogoletnemerzlykh gruntov: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. - Ufa, 2016. - 24 s.
6. Naumova, G.A. Raschet truboprovodnykh konstruksiy s ekspluatatsionnymi povrezhdeniyami / G.A. Naumova [i dr.] - Volgograd: Izd-vo VolgGASU, 2009. - 184 s.
7. Ovchinnikov, I.G. O metodologii postroeniya modeley konstruksiy vzaimodeystvuyushchikh s agressivnymi sredami / I.G. Ovchinnikov // Dolgovechnost' materialov i elementov konstruksiy v agressivnykh i vysokotemperaturnykh sredakh. - Saratov, 1988.
8. Yavarov, A.V. Napryazhenno - deformirovannoe sostoyanie podzemnykh truboprovodov / A.V. Yavarov [i dr.] // internet - zhurnal «Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy». - 2013. - №1 (6).
9. Svetlitskiy, V.A. Mekhanika gibkikh sterzhney i nitey / V.A. Svetlitskiy - M.: Izd-vo Mashinostroenie, 1978. - 222 s.
10. Shcherbakov, V.P. Prikladnaya mekhanika niti / V.P. Shcherbakov - M.: Izd-vo RIO MGTU im. A.N. Kosygina, 2001. - 301 s.
11. Merkin, D.R. Vvedenie v mekhaniku gibkoy niti / D.R. Merkin - M.: Nauka, 1980. - 240 s.
12. Kazakevich, M.I. Aerodinamicheskaya ustoychivost' nadzemnykh i visyachikh truboprovodov / M.I. Kazakevich - M.: "Nedra", 1977. - 200 s.
13. Abdel'masikh, Bakoss Mussa. Visyachie sistemy nadzemnoy prokladki truboprovodov: Dis. kand. tekhn. nauk. - K., 1990.-133 s.
14. Petrov, I.P. Nadzemnaya prokladka truboprovodov / I.P. Petrov, V.V. Spiridonov, - 1965. - 447 s.
15. Tartakovskiy, G.A. Stroitel'naya mekhanika truboprovodov / G.A. Tartakovskiy. - Moskva: Nedra, 1967. - 312 s.
16. Buldakov, E.L. Metodika rascheta nesushchey sposobnosti magistral'nogo nefteprovoda, prolozhenno v skal'nykh gruntakh, pod vozdeystviem seysmovzryvnykh voln: Dis. kand. tekhn. nauk. – Sankt-Peterburg, 2015.-105 s.
17. Prikladnaya mekhanika. Teoriya tonkikh uprugikh sterzhney: uchebnoe posobie / P.A. Zhilin. - SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2007. - 100 s.
18. Eliseev, V.V. Mekhanika uprugikh sterzhney / V.V. Eliseev - SPb.: Izd-vo SPbGTU, 1994. - 84 s.
19. Osnovy dinamiki i ustoychivosti sterzhnevnykh sistem: uchebnoe posobie / A.M. Maslennikov. - M.: Izd-vo ASV, 2000. - 204 s.
20. Lalin, V.V. Dinamicheskoe povedenie beskonechnykh sterzhnevnykh elementov na uprugo-vyazkom osnovanii pod deystviem tochechnogo istochnika vozmushcheniya / V.V. Lalin, G.V. Denisov // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arkhitektura. - 2013. - №2 (30). - S. 105 - 113.

21. Popov, E.P. Nelineynye zadachi statiki tonkikh sterzhney / E.P. Popov - M.: Izd-vo OGIK, 1948. - 170 s.
22. Popov, E.P. Teoriya i raschet gibkikh uprugikh sterzhney / E.P. Popov - M.: Izd-vo Nauka, 1986. - 296 s.
23. Svetlitskiy, V.A. Mekhanika truboprovodov i shlangov / V.A. Svetlitskiy - M.: Mashinostroenie, 1982. - 279 s.
24. Shammazov, A.M. Raschet i obespechenie prochnosti truboprovodov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh. Tom 1. Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ustoychivosti truboprovodov / A.M. Shammazov [i dr.] - M.: Inter, 2005. - 706 s.
25. Masalimov, R.B. Ispol'zovanie uravneniy izgiba sterzhnya dlya issledovaniya napryazhenno - deformirovannogo sostoyaniya i ustoychivosti truboprovoda s krivymi vstavkami / R.B. Masalimov, R.M. Zaripov // internet-zhurnal «Neftegazovoe delo». - 2011. - №1.
26. Razov, I.O. Analiticheskie metody rascheta dinamicheskikh kharakteristik pryamolineynykh tonkostennykh truboprovodov bol'shogo diametra pri nazemnoy prokladke: Dis. kand. tekhn. nauk. – Tyumen', 2015. - 130 s.
27. Bolotin, V.V. Vibratsii v tekhnike: monografiya / pod obshch. red. V.V. Bolotina. – M.: Mashinostroenie, 1978. - 352 s.
28. Bolotin, V.V. Dinamicheskaya ustoychivost' uprugikh sistem / V.V. Bolotin. – M.: Gos. izd-vo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1956. - 600 s.
29. Vaynberg, D.V. Mekhanicheskie kolebaniya i ikh rol' v tekhnike / D.V. Vaynberg, G.S. Pisarenko. – M.: Nauka, 1965. - 276 s.
30. Gastev, V.A. Poperechnye kolebaniya i ustoychivost' sterzhney pri deystvii periodicheski povtoryayushchikhsya prodol'nykh impul'sov / B.A. Gastev // Trudy Leningradskogo instituta aviapriborostroeniya, 1949, vyp. 1.
31. Gol'denblat, I.I. Nekotorye voprosy kolebaniy i dinamicheskoy ustoychivosti uprugikh sistem / I.I. Gol'denblat // sb. statey. Issledovatel'skie raboty po inzhenernym konstruktsiyam. - Stroyizdat, 1948. - S. 4 - 12.
32. Ishemguzhin, I.E. Dempfirovanie parametricheskikh kolebaniy truboprovoda / I.E. Ishemguzhin [i dr.] // internet-zhurnal «Neftegazovoe delo». – 2011. - №3. - S. 84 – 93.
33. Il'in, V.P. Issledovanie parametricheskogo rezonansa v truboprovodakh, sodержashchikh pul'siruyushchiy potok zhidkosti / V.P. Il'in, V.G. Sokolov // Voprosy mekhaniki stroitel'nykh konstruktsiy i materialov. Mezhvuzovskiy tematicheskii sbornik. – L., 1987. - S. 6 - 10.
34. Lalin, V.V. Razlichnye formy uravneniy nelineynoy dinamiki uprugikh sterzhney // Trudy SPbGPU № 489. (Mekhanika materialov i prochnost' konstruktsiy). SPb.: Izd-vo SPbGPU. - 2004. - S. 121-128.
35. Oniashvili, O.D. Nekotorye dinamicheskie zadachi teorii obolochek / O.D. Oniashvili. – M.: Izd. AN SSSR, 1957. - 195 s.
36. Timoshenko, S.P. Kolebaniya v inzhenernom dele / S.P. Timoshenko. – M.: Nauka, 1967. - 444 s.

37. Arnold, R.N. Flexural vibration of the walls of thin cylindrical shells having free supported ends / R.N. Arnold, G.B. Warburton // Proc. Of the Roy. Soc. Of London. – 1949. – Ser A, Vol. 197.
38. Chany, H.H. On the flexural vibrations of a pipeline containing flowing fluid / H.H. Chany, T.W. India // Proc. Theoret. and Appl. Mech. India. – 1957. – P. 254.
39. Chen, H. Vibration of a Pipeline Containing Fluid Flow with Elastic Support / Chen, H. // M. Sc. Thesis, Ohio University. – 1991. – P. 61.
40. Djondjorov, P. Dynamic stability of fluid conveying cantilevered pipes on elastic foundations / Djondjorov, P., Vassilev, V., and Dzhupanov // Journal of Sound and Vibration. – 2001. Vol. 247(3) – P. 537 – 546.
41. Paidoussis, M.P. Dynamic stability of pipes conveying fluid / M.P. Paidoussis, N.T. Issid // Journ. of sound and vibr. – 1974. – 33 (3). – P. 264 – 294.
42. Weaver, D.S. On the dynamic stability of fluid conveying pipes / D.S. Weaver, T.E. Unny // Journ. Appl. Mech. – 1973. – Vol.40. – P. 51 – 54.
43. Karpov, V.V. Geometricheski nelineynye zadachi dlya plastin i obolochek i metody ikh resheniya / V.V. Karpov. – M.: Izd-vo ASV, 1999. - 154 s.
44. Lur'e, A.I. Statika tonkostennykh uprugikh obolochek / A.I. Lur'e. - M.: Izd-vo Gostekhizdat, 1947. - 252 s.
45. Mushtari, Kh.M. Nelineynaya teoriya uprugikh obolochek / Kh.M. Mushtari, K.Z. Galimov. - Kazan': Tatknigizdat, 1957. – 520 s.
46. Novozhilov, V.V. Lineynaya teoriya tonkikh obolochek / V.V. Novozhilov. - L.: Izd-vo Politekhnik, 1991. - 656 s.
47. Timoshenko, S.P. Plastinki i obolochki / S.P. Timoshenko, S. Voynovskiy-Kruger. - M.: Izd-vo Fizmatgiz, 1963. - 636 s.
48. Filin, A.P. Elementy teorii obolochek / A.P. Filin. - L: Izd-vo Stroyizdat. Leningr. otdnie, 1987. - 384 s.
49. Rudachenko, A.V. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov / A.V. Rudachenko, A.L. Saruev; Tomskiy politekhnicheskii universitet. - Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011. - 136 s.
50. Osokin, I.A. Primenenie teorii obolochek vrashcheniya k raschetu gofirovannykh vodopropusnykh trub / I.A. Osokin // internet-zhurnal «Naukovedenie». – 2013. - №2.
51. Flyugge, V. Statika i dinamika obolochek / V. Flyugge. – M.: Gosstroyizdat, 1961. - 306 s.
52. Vlasov, V.Z. Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozheniya v tekhnike / V.Z. Vlasov. - M.:Gostekhizdat, 1949. - 784 s.
53. Donnel, L.H. A new theory for the buckling of thin cylinders under axial elastic foundations / Djondjorov, P., Vassilev, V., and Dzhupanov // Journal of Sound and Vibration. - 2001. Vol. 247 (3) - P. 537 - 546.
54. Ivanyuta, E.I. O vliyaniy tangentsial'nykh sil inertsiy na velichinu chastoty svobodnykh kolebaniy tonkoy tsilindricheskoy obolochki / E.I. Ivanyuta, R.M. Finkel'shteyn // Issledovaniya po uprugosti i plastichnosti. – L.: LGU, 1963. vyp.2 - S. 212 - 215.

55. Kukudzhanov, S.N. Kolebaniya i dinamicheskaya ustoychivost' obolochek vrashcheniya, blizkikh k tsilindricheskim, nakhodyashchikhsya pod deystviem normal'nogo davleniya i meridional'nykh usiliy / S.N. Kukudzhanov // *Izv. RAN, MTT.* - 2006. - №2. - S. 48 - 59.
56. Kukudzhanov, S.N. O vliyani normal'nogo davleniya na chastoty sobstvennykh kolebaniy tsilindricheskikh obolochek / S.N. Kukudzhanov // *Mekhanika tverdogo tela*, 1968. - №3. - S. 14 - 20.
57. Kukudzhanov, S.N. O vliyani normal'nogo davleniya na chastoty sobstvennykh kolebaniy obolochek vrashcheniya, blizkikh k tsilindricheskim / S.N. Kukudzhanov // *Izv. RAN, MTT.* - 1996. - №6. - S. 121–126.
58. Novozhilov, V.V. Teoriya tonkikh obolochek / V.V. Novozhilov. – L.: Sudprogaz, 1962. - 430 s.
59. Il'in, V.P. O primeneni polubezmomentnoy teorii k opredeleniyu chastot svobodnykh kolebaniy krugovoy tsilindricheskoy obolochki / V.P. Il'in, O.B. Khaletskaya // *Vsb.: Issledovaniya po raschetu stroitel'nykh konstruksiy* // *Trudy LISI*, - 1974. - №89. - S. 49 - 60.
60. Il'in, V.P. Primenenie polubezmomentnoy teorii k zadacham rascheta tonkostennykh trub // *Vsb.: Problemy rascheta prostranstvennykh konstruksiy* // *Trudy MISI*. - M.: 1980. - S. 45 - 55.
61. Aksel'rad, E.L. Raschet truboprovodov / E.L. Aksel'rad, V.P. Il'in. – L.: Mashinostroenie, 1972. - 240 s.
62. Klok, B.A. Prochnost' i remont magistral'nykh truboprovodov v Zapadnoy Sibiri / B.A. Klok [i dr.] – M.: Mashinostroenie, 1994. - 120 s.
63. Naumova, G.A. Raschety na prochnost' slozhnykh sterzhnevykh i truboprovodnykh konstruksiy / G.A. Naumova, I.G. Ovchinnikov. – Saratov: SGTU, 2000. - 227 s.
64. Lanchakov, G.A. Rabotosposobnost' truboprovodov. V 3-kh ch. Ch. 2. Soprotivlyaemost' razrusheniya / G.A. Lanchakov [i dr.] - 2001. - 350 s.
65. Kabanin, V.V. Modelirovanie korroziionnogo rastreskivaniya obolocheknykh konstruksiy / V.V. Kabanin [i dr.] - Saratov. Izd-vo SGU, 2006. - 124 s.
66. Kabanin, V.V. Prochnost' obolochek vrashcheniya, podvergayushchikhsya korroziionnomu iznosu v neodnorodnom pole temperatur / V.V. Kabanin [i dr.] - *Volgogr. gos. arkh. – stroit. un-t. Volgograd. Izd – vo VolgGASU*, 2007. - 108 s.
67. Ovchinnikov, I.I. Nakoplenie povrezhdeniy v sterzhnevykh i plastinchatykh armirovannykh konstruksiyakh, vzaimodeystvuyushchikh s agressivnymi sredami / I.I. Ovchinnikov, G.A. Naumova - *Volgogr. gos. arkh. – stroit. un-t. Volgograd. Izd – vo VolgGASU*, 2007. - 272 s.
68. Ovchinnikov, I.I. Identifikatsiya i verifikatsiya modeley korroziionnykh i deformatsionnykh protsessov / I.I. Ovchinnikov, I.G. Ovchinnikov - Saratov: SGTU, 2014. - 164 s.