

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ О РЕНОВАЦИИ И ПЕРЕПРОФИЛИРОВАНИИ ТРУБОПРОВОДОВ И ЯВЛЕНИЙ ГИДРОУДАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИННОВАЦИЙ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Можаровский В. В.¹, Василевич Ю. В.², Киргинцева С. В.¹

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель,
Беларусь,

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Введение. С развитием и созданием новых композиционных материалов повышается их роль в различных отраслях машиностроения, происходит активное их внедрение в промышленность, в разработку и конструирование современных элементов конструкций. Благодаря таким свойствам как легкий вес, коррозионная устойчивость, более высокая прочность и лучшие термические и электрические свойства, они широко используются в промышленности, строительстве. На современном уровне развития математических моделей при расчете напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из композиционных материалов (таких, как трубы, сосуды) имеется обширная литература, но в то же время, возникает необходимость создания компьютерных программ расчета для сложных тел, таких как композиты, с учетом изменяющихся граничных и краевых условий, динамических нагрузжений и функционально-градиентных свойств материалов (ФГМ). Исследование в данной области является актуальным и широко применяется при создании инженерных методик расчета во всем мире. Несмотря на большие достижения в области расчета слоистых цилиндрических тел с учетом эффектов композитов, проблема решения смешанных задач с различными граничными условиями применительно к моделированию работы колебаний, например, трубопроводов, реновации и перепрофилировании трубопроводов, слоистых сосудов из ФГМ и других элементов машин, достаточно полно не освещена.

Технология CIPP («Cured-in-place pipe») трубопроводов. Многолетняя эксплуатация трубопроводов неразрывно связана с такими явлениями, как коррозия, утечка, разрывы, пренебрежение которых могут вызывать просадки дорог и экологические аварии, что, в свою очередь, имеет социальные последствия. Обслуживание и ремонт подземных трубопроводов чаще всего проводится путем извлечения поверхностных слоев грунта и раскопки открытых траншей, удаления изношенных трубопроводов, замены их на новые и засыпки. Эти процедуры могут нанести ущерб окружающей среде. Решением этой проблемы могут быть бестраншейные методы восстановления трубопроводов, которые заключаются в ремонте существующих трубопроводов без выемки грунта.

Одним из таких методов является футеровка (технология CIPP, «Cured-in-place pipe») или метод полимеризации на месте трубы [1], процесс использования которой заключается во вставке пропитанной смолой гильзы в изношенный заглубленный трубопровод, расширение хвостовика и закрепление его на месте, используя ультрафиолетовый свет или другие технологии (закачивания горячего воздуха или воды). В результате получается новая труба внутри изношенной трубы. Технология CIPP была впервые разработана британским инженером Эриком Вудом, в 1971 году получила международный стандарт ISO 9000 [2]. Например, наглядно схема бестраншейного производственного восстановления трубопроводов представлена на рисунке 1.1 [2].

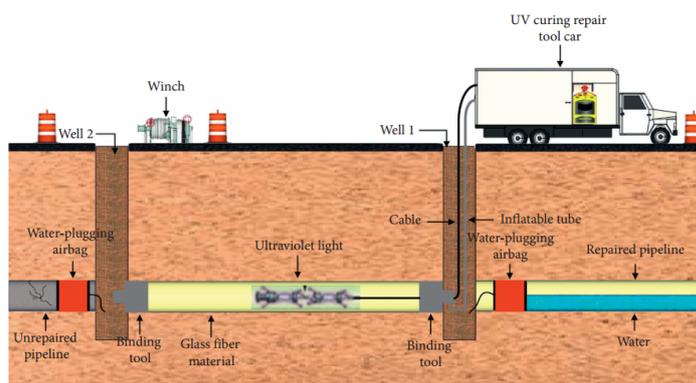


Рис. 1.1. Новая производственная технология CIPP ремонта трубопроводов [2]

Далее, следуя представленному в [2] хорошему обзору зарубежных новых достижений в развитии технологий CIPP, можно заключить об актуальности данной проблемы. Действительно, повторяя анализ литературных источников [3–15], описанных в [2] (см. ниже), можно заключить, что было проведено большое количество исследований, посвященных совершенствованию процесса строительства и обеспечению безопасности технологии CIPP, например, в работах [3; 4] показано использование CIPP и рекомендации при восстановлении достаточно длинных труб из железобетона и керамики в США. Так, согласно статьи [2], в [5] исследовали срок службы лайнера CIPP, исследуя параметры вкладышей, геометрические и механические характеристики, а именно: толщину кольцевого зазора, овальность, плотность, удельный вес, пористость, прочность на изгиб, модуль упругости при изгибе, прочность на разрыв, модуль упругости, твердость поверхности, температуру стеклования, определялся предполагаемый срок службы. Современная база данных о производительности восстанавливающих технологий и оценки срока службы CIPP для труб, используемых в водоснабжении и канализации, представлена в [6]. Краткий анализ проведенных экспериментальных исследований конструкций CIPP и для различных вкладышей при действии гидростатического давления, описанных в работе

[7], также можно найти в статье [2]. Влияние воздействия окружающей среды на СИРР, выбросы из ливневых канализационных установок исследовано в [8]. В [9] определяли сейсмические характеристики и прочность прямых подземных трубопроводов случае деформации грунта. Описанные исследования направлены на улучшение строительства и оценки производительности СИРР использования для восстановления труб.

Оригинальные исследования о механизме восстановления труб с использованием СИРР показано в [10]. Процесс ремонта труб, определения напряженного состояния и численный анализ слоистых труб, а также определения механических постоянных, эксплуатация трубопроводов в экстремальных условиях описано в [2] на основании исследований [10–15]. Так, в работе [11] исследовали напряженное состояние и смещение трубопроводов до и после ремонта, влияние толщины стенки СИРР на прочность трубопровода при различном внутреннем давлении с учетом анализа состояния поверхностей труб, используя программное обеспечение. В работе [12] дана методика и проведен численный анализ напряжений для труб с футеровкой СИРР. Механические исследования прочности и прогиба композита СИРР, изгибного модуля упругости проведено в [13]. Испытания на прочность СИРР в условиях, моделирующих землетрясения, эффекта резкого движения грунта, удлинения и изгиба трубопровода с трещинами проведено в [14; 15]. При создании футеровок большое значение имеет учет динамики трубопровода.

На основании разработанных теорий и компьютерных расчетов [16; 17] можно усовершенствовать технологию создания высокопрочных полимерных рукавов для трубопроводов. Разрабатываются теоретические алгоритмы и строятся математические модели для определения напряженного и деформированного состояния слоистых труб из композитов в динамике (гидроудар), которые найдут применение для создания ремонтных покрытий, используемых комплексных рукавов (санации полимерным чулком) для трубопроводов. В интернете имеется многочисленное описание разработок по ремонту труб методом санации полимерным рукавом (см., например, [18–20] и др.).

Разработки, которые планируются для создания основы в направлении развития тематики – реновации и перепрофилировании трубопроводов с использованием инновационных технологий – важны для Беларуси (см. компания ООО «ГИДРОПОЛИМЕР» [17]). Следует отметить, что такие технологии имеются в развитых Европейских странах и в США, КНР, России, Украине др. В Беларуси также имеются фирмы, оказывающие такие услуги, например, ООО «ГеоЦентрГрупп» филиал Российской компании (Санкт-Петербург), Компания «ГРАДИСС» обладает собственным оборудованием для производства полимерных рукавов для санации трубопровода. Так, например, в «ГРАДИСС» и «РосПайп» [16–18] используются трехкомпонентный – из пленочного (защитного), армирующего (из синтетического войлока) и раздувочного (из полимерной пленки); предназначен

для труб диаметром 150–200 мм; а также четырехкомпонентный – из пленочного (защитного), комбинированного стеклоармирующего полотна, армирующего (из синтетического войлока) и раздувочного (из полимерной пленки); предназначен для труб диаметром от 300 до 450 мм. Из описания технологии компании [16] в основе «...изготовления рукава состоит в раскройке стекло-холста до нужной ширины, складывании и прошивке внахлест на рукавной машине (например, японской фирмы «Brotcher»). Диаметр полученной заготовки должен быть меньше диаметра ремонтируемого участка трубы на 1–3 % для избегания складок. В то же время подвижность шва и материала должна обеспечивать плотное прилегание рукава к внутренней стенке трубы. В процессе сшивки армирующего рукава в него помещается прочная капроновая лента. После сшивки рукав свертывается в рулон и поступает на сборку. Сборка включает два этапа: протягивание армирующего рукава в наружный полиэтиленовый и протягивание внутреннего раздувочного рукава в армирующий...». В процессе изготовления и эксплуатации таких реанимируемых труб возникают динамические ударные эффекты, типа гидроудара, которые нужно рассчитать и создать компьютерную программу определения напряженно-деформированного состояния изделий, скорость волны удара. Такие расчеты необходимы для оптимального выбора материала композита с целью предотвращения разрыва, разрушения трубопровода. Дальнейшие разработки найдут применение на предприятиях теплоснабжения и водоканализации Республики Беларусь (Витебскэнерго, Могилевский завод полимерных труб и др.). Кроме того, разрабатываются алгоритмы и программы, реализующие расчет и хранение различных характеристик стальных труб ППУ (водопоглощение, прочность на сдвиг в осевом направлении, прочность на сдвиг в тангенциальном направлении и т. д.) и применения для ПИ-труб.

Проблемы вибрации трубопровода. Трубопроводная жидкость является очень важным компонентом для большинства инженерных сооружений, ядерного реактора, теплообменника, морских стояков, нефтепроводов, микрофлюидных, наножидкостных устройств и других. В последние десятилетия был тщательно изучен анализ свободной вибрации трубопровода для транспортировки жидкости.

Проблемы вибрации трубопровода, транспортирующего жидкость, были проанализированы с помощью различных методов. Существует множество численных и аналитических методов, используемых при решении задач вибрации данных конструкций, как в нелинейной, так и в линейной динамике, таких как метод конечных элементов [20], метод Галеркина [21], методом контроля и управления структурой [22], упрощенный метод [23]. Линейная динамика трубопровода, транспортирующего жидкость, с использованием метода Галеркина дана в [24]. В работе [25] представлена разработка метода вибрационной итерации для анализа свободной вибрации транспортирующей жидкости в трубе, получена критическая скорость потока и частота для транспортирующей жидкости трубы.

Метод дифференциального преобразования предложен для решения линейных и нелинейных задач на основе расширения ряда Тейлора в [26]. Этот метод является эффективным и не сложным для решения дифференциальных уравнений линейного и нелинейного характера. В [27] проанализирована свободная вибрация для жидкости, транспортируемой по трубе, со многими типичными граничными условиями, используя метод дифференциального преобразования. В этой работе показано, что метод дифференциального преобразования обладает вычислительной эффективностью и высокой точностью для анализа вибрации в трубопроводах для транспортировки жидкости. В то же время отмечено, что метод может быть применен для анализа отклика на статическую и динамическую нелинейность для трубопроводов для транспортировки жидкости.

Задача о свободной вибрации с различными упруго ограниченными конечными условиями однородной балки была изучена в [28] с использованием метода дифференциального преобразования для решения соответствующей начально-краевой задачи. В работе дается сравнение частот колебаний для данного метода с теми, которые названы методами декомпозиции и вариационной итерации. Отмечено, что дифференциальное преобразование обладает вычислительной эффективностью и высокой точностью в задаче вибрации для балочной конструкции и точность собственных частот повышается с увеличением числа членов N . В статье [29] проанализированы собственные частоты, форма режимов и критическая скорость жидкости в трубопроводах на основе модели Тимошенко с использованием метода дифференциального преобразования. В работе дано решение уравнения движения с различными граничными условиями конца трубы. Было показано, что результаты аналитического метода хорошо согласуются по сравнению с другими методами.

В [30] разработана теоретическая модель вибрации микротрубки на основе модифицированной теории связанных напряжений, дано решение уравнения движения. Также было обнаружено, что частоты колебаний уменьшаются с увеличением скорости внутреннего потока. Кроме того, он обнаружил, что микротрубка будет нестабильной из-за расхождения в критической скорости потока. В [31] и в [32] использовали теорию Тимошенко и Эйлера для изучения динамического поведения микропроводов для транспортировки жидкости. Сделан вывод, что критическая скорость и основная частота будут зависеть от размера, когда внешний диаметр микропроводов сравнивается с параметром масштаба длины.

В [33] исследовали влияние микроструктуры и микропотока на изгибные колебания труб, транспортирующих жидкость в микромасштабе. Результаты показали, что влияние микроструктуры приводит к усилению системы трубопроводов и, следовательно, к увеличению критической скорости потока; кроме того, результаты показали, что профиль скорости потока имеет тенденцию уменьшать критическое среднее значение скорости потока. Новые материалы, которые являются функционально-градиентными,

представляют собой микроскопически неоднородные композитные материалы, механические свойства которых непрерывно изменяются от одной поверхности к другой поверхности, были использованы в [34]. Эти материалы, т. е. функционально-градиентные (ФГМ), в [35] использовали, считая его современным новым материалом, который обладает хорошими сложными конструкционными свойствами благодаря своим характеристикам термостойкости.

Уравнение, определяющее собственные значения, было получено с использованием метода Рэлея, и результаты показывают, что частотные свойства идентичны тем, которые наблюдаются для однородных изотропных цилиндрических оболочек. Проблема анализа вибрации и неустойчивости вращающихся тонкостенных балок с ФГМ материалами была изучена в [36]. Термомеханическая стабильность тонкостенной транспортирующей жидкости консольной трубы, изготовленной из функционально-градиентной, и ее нагрузки посредством сжимающей осевой силы была исследована в [37]. Труба сформулирована на основе теории Рэлея, а для решения уравнений движения использовался расширенный метод Галеркина. В [38] разработана теория модифицированного связанного напряжения, в которой в уравнении фигурирует только один параметр масштаба длины, для интерпретации эффекта модификации были проанализированы кручение цилиндрического стержня и чистый изгиб плоской пластины неограниченной ширины. Затем ряд исследователей [39–42] использовали теорию модифицированного связанного напряжения для исследования механического поведения микропучков ФГМ, а также исследовали собственную частоту, критическую нагрузку на изгиб. Было обнаружено, что эффект размера усиливается за счет уменьшения толщины. В [43; 44] изучали свободную вибрацию однослойных графеновых таблеток и конических микропучков Бернулли-Эйлера с осевой функциональностью, основанных на модифицированной теории парных напряжений, соответственно. В [45] изучили аналитическое решение для нелинейного анализа колебаний в зависимости от размера для ФГМ микромасштабной трубы с теорией градиента деформации. В работе [46] исследовали свободную вибрацию и стабильность для многопролетной микротрубки FGM для транспортировки жидкости. Известно, что свойства микротрубок ФГМ непрерывно изменяются в направлении толщины в соответствии со степенным законом. Гибридный метод был усовершенствован для определения частот вибрации и стабильности. Обсуждалось влияние ряда опор, параметра масштаба длины и показателя объемной доли на динамические свойства. Анализ результатов показал, что основные частоты, определенные теорией модифицированного напряжения, больше, чем частоты, полученные с использованием классической теории пучков. Кроме того, результаты показали, что критические скорости и собственные частоты увеличиваются с увеличением объемной доли показателя, когда она меньше 10.

В [47] исследуются поперечные колебания протяженного прямолинейного участка трубопровода с равномерно движущейся жидкостью. Здесь для первых трех мод построены зависимости собственных значений от величины скорости течения жидкости (от нуля до скорости выпучивания), изучены их свойства в зависимости от инерционного параметра. Показано, что уменьшение инерционного параметра при фиксированном значении скоростного параметра приводит к увеличению собственных частот поперечных колебаний трубопровода. В исследовании [48] собственные частоты определяются с помощью формул Феррари. В [48] рассматриваются колебания трубопровода с жидкостью. Скорость течения жидкости не учитывается. Концы трубопровода закреплены одним из четырех видов закреплений: заделка, свободное опирания, плавающая заделка, свободный конец. Комбинации этих закреплений на левом и правом концах образуют 16 видов закреплений. Решается задача определения закреплений трубопровода по известным собственным частотам колебаний. В работах [49; 50] также исследуются колебания трубопровода с жидкостью без учета ее скорости течения. Показано, что по пяти собственным частотам изгибных колебаний трубопровода можно однозначно определить вид и параметры закреплений. Для идентификации параметров закрепления трубы с протекающей в ней жидкостью необходимо знать много собственных частот. Это показано в работе [51].

Футерованные трубы из современных композиционных материалов, явление гидроудара. Современные инженерные конструкции все более оснащаются элементами конструкций, содержащими композиционные материалы [52]. Среди них широко используются трубопроводы и резервуары, для которых необходимо учитывать различные факторы, влияющие на их надежность и долговечность функционирования. Одним из основных факторов, которые влияют на напряженное состояние слоистых конструкций (трубопроводов), является температура. В работе предлагается методика реализации расчета слоистой трубы при действии внутреннего давления и температуры. Математическая модель описания расчета базируется на линейной теории упругости анизотропного тела [53; 54].

Развитие современной техники требует разработки новых материалов, способных работать в сложных эксплуатационных условиях – при воздействии повышенных давлений, температур и агрессивных сред. К подобным материалам относятся также композиционные материалы с полимерной, металлической или другой матрицей. Волокнистые композиты обладают рядом характерных уникальных свойств – повышенной направленной прочностью, жесткостью, выдерживают высокотемпературные деформации, обладают низким коэффициентом термического расширения. Важно отметить, что такие параметры работоспособности зависят не только от свойств волокон и матрицы, но и от доли фракции волокон, способов их армирования. Применение гетерогенных материалов определяется в большей степени условиями эксплуатации и требованиями к физико-механи-

ческим характеристикам будущей конструкции. Большой практический интерес представляют слоистые структуры, которые способны существенно повлиять на характер распределения нагрузок, что может повысить прочность и износостойкость изделий. Предлагаются исследования об определении параметров эксплуатации футерованных труб из современных композиционных материалов согласно новой современной технологии CIPP по ремонту труб без проведения земляных работ. Эта технология достаточно проста и начала широко применяться во всем мире. Суть этой технологии такая же, как было описано ранее, и заключается в том, что в поврежденный участок трубы вводится футеровка из волокнистых композитных материалов со смолой (пропитанная труба, изготовленная из стекловолокна, углеродного волокна или другого пропитанного смолой вещества), которая прикрепляется к трубе под действием давлений воды или пара, и получается новая слоистая отремонтированная труба. Ключевым моментом этой технологии является расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) в сечении трубы с композитной футеровкой и нахождение допустимой толщины покрытия, а также определение скорости волны при гидроударе [55–57]. Некоторое теоретическое решение по расчету (НДС) футерованной трубы из композиционного материала представлено в [52], здесь также дана постановка линейной упругой задачи для ортотропных материалов, геометрические и граничные условия. Решение задачи о расчете НДС двухслойной ортотропной трубы, в которой слои состоят из разных материалов, при действии внутреннего давления и нулевого наружного, представлено в случае плоского напряженного состояния.

Численное моделирование и прогнозирование внезапного повышения или понижения давления очень важны для защиты трубопроводов от нежелательных повреждений из-за эффекта гидроудара. Явление гидравлического удара было впервые обосновано в 1898 г. выдающимся российским ученым – Н. Е. Жуковским [58]. Одной из основных составляющих элементов этой проблемы является регулирование возможного максимального давления путем оптимальной эксплуатации, а также выбор надежных материалов и проектирование защитных устройств в трубопроводах. На современном этапе развития технологий такими материалами могут быть композиты. Скорость ударной волны является основным фактором в моделировании переходных процессов, который может значительно изменять частоту и амплитуду волн гидроудара, а также экстремальные переходные распределения давления вдоль трубопровода. Скорость волны зависит от многих факторов, таких как плотность и модуль упругости жидкости, материала и формы трубы. Широко известны формулы для определения скорости ударных волн в однослойных изотропных трубах [59], однако они дают погрешности при применении для труб из композитных материалов. В работе [60] представлены зависимости, определяющие скорость волны жидкости в однослойных и двухслойных изотропных и ортотропных трубах. В этой работе, на основе ранее предложенного подхода, моделируются

и сравниваются параметры гидравлического удара для однослойных труб с различными схемами армирования. Результат показывает, что армирование может увеличить скорость ударной волны и вызвать дополнительные гидравлические скачки давления в трубопроводе, которые определяются с помощью математического моделирования.

Заключение. В настоящей работе предложен краткий обзор научных исследований в области разработки новых технологий, применяющихся к ремонту подземных трубопроводов, показано применение теоретических и численных методов расчета напряженно-деформированного состояния цилиндрических труб из волокнистых композитов, в том числе для труб из слоистых композитов в динамике. Приводятся современные инженерные и научные разработки, касающиеся определения скоростей волны при гидроударе и напряженно-деформированное состояние слоистых футерованных труб из ортотропных материалов, влияние расположения волокон в трубе из композита на параметры гидравлического удара.

Изложенные существующие методики, описанные в обзорной статье, могут применяться при создании новых технологий для транспортного машиностроения, теплоэнергетики, строительства нефтесборных трубопроводов, и других отраслей, а также результаты могут найти применение в производстве слоистых труб и в учебном процессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wave celerity in hydraulic transients computation for cipp-rehabilitated pipes / F. Evangelista [et al.] // *Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas.* – 2020. – Vol. 8, № 4. – P. 326–340.
2. Parameter analysis of wall thickness of cured-in-place pipe linings for semi-structured rehabilitation of concrete drainage pipe / F. Hongyuan [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering.* – 2020. – Article ID 5271027. – P. 1–16.
3. Matthews, J. C. Large-diameter sewer rehabilitation using a fiber-reinforced cured-in-place pipe / J. C. Matthews // *Practice Periodical on Structural Design and Construction.* – 2014. – Vol. 20, № 2. – P. 326–340.
4. Matthews, J. Sewer rehabilitation using an ultraviolet-cured GFR cured-in-place pipe / J. Matthews // *Practice Periodical on Structural Design and Construction.* – 2015. – Vol. 20, № 1. – 7 p.
5. A pilot study for retrospective evaluation of cured-in-place pipe (CIPP) rehabilitation of municipal gravity sewers / E. Allouche [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology.* – 2014. – Vol. 39. – P. 82–93.
6. A retrospective evaluation of the performance of liner systems used to rehabilitate municipal gravity sewers / S. Alam [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology.* – 2015. – Vol. 50. – P. 451–464.
7. Straughan, W. T. Long-term structural behavior of pipeline rehabilitation systems / W. T. Straughan, L. K. Guice, C. Mal-Duraipandian // *Journal of Infrastructure Systems.* – 1995. – Vol. 1, № 4. – P. 214–220.

8. Considerations for emission monitoring and liner analysis of Mathematical Problems in Engineering 15 thermally manufactured sewer cured-in-place-pipes (CIPP) / K. Ra [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2019. – Vol. 371. – P. 540–549.
9. Zhong, Z. Numerical simulation and seismic performance evaluation of buried pipelines rehabilitated with cured-in-place-pipe liner under seismic wave propagation / Z. Zhong, A. Filiatrault, A. Aref // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. – 2017. – Vol. 46, № 5. – P. 811–829.
10. Jeon, S.-S. Repetitive loading effects on cast iron pipelines with cast-in-place pipe lining systems / S.-S. Jeon, T. D. O'Rourke, A. N. Neravali // *Journal of Transportation Engineering*. – 2004. – Vol. 130, № 6. – P. 692–705.
11. Shou, K. J. Numerical analysis of the mechanical behaviors of pressurized underground pipelines rehabilitated by cured-in-place-pipe method / K. J. Shou, B. C. Chen // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2018. – Vol. 71. – P. 544–554.
12. Chuk, C. Numerical analysis of stresses for cured-in-place-pipe linings / C. Chuk, G. Urgessa, H. Oippeswamy // *WIT Transactions on He Built Environment*. – 2011. – Vol. 71. – P. 283–293.
13. Ji, H. The mechanical properties of high strength reinforced cured-in-place pipe (CIPP) liner composites for urban water infrastructure rehabilitation / H. Ji, S. Yoo, J. Kim, D. Koo // *Water*. – 2018. – Vol. 10, № 8. – 12 p.
14. Large-scale fault rupture tests on pipelines reinforced with cured-in-place linings / C. Argyrou, T. D. O'Rourke, H. E. Stewart, B. P. Wham // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2019. – Vol. 145, № 3, Article ID 04019004. – P. 283–293.
15. Retrofitting pipelines with cured-in-place linings for earthquake-induced ground deformations / C. Argyrou, D. Bouziou, T. D. O'Rourke, H. E. Stewart // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2018. – Vol. 115. – P. 156–168.
16. Ремонт труб методом санации полимерным рукавом : [сайт]. – URL : <https://otdelka-remont.ru/remont-trub-metodom-sanatsii-polimernym-rukavom/> (дата обращения: 10.01.2024).
17. Гидрополимер. Услуги : [сайт]. – URL: <https://hydropolymer.by/services/>. (дата обращения: 10.01.2024).
18. Санация полимерным рукавом (чулком) : [сайт]. – URL: <https://www.smgб.ru/articles/sanaciya-polimernym-rukavom-chulkom.-osobennosti-tehnologii-i-etapy-vostranovleniya-truboprovoda.html> (дата обращения: 10.01.2024).
19. Технология восстановления трубопроводов с помощью комплексных полимерных рукавов : [сайт]. – URL: <https://ros-pipe.ru/clauses/stroitelstvo-remont-truboprovodov/tehnologiya-vostranovleniya-truboprovodov-s-pomos429/>. (дата обращения: 10.01.2024).

20. Zhang, Y. L. A finite element method for modelling the vibration of initially tensioned thin-walled orthotropic cylindrical tubes conveying fluid / Zhang Y. L., Daniel G. Gorman, J. M. Reese // *Journal of Sound and Vibration* 245. – 2001. – № 1. – P. 93–112.
21. Sarkar, A. A cantilever conveying fluid: coherent modes versus beam modes / Sarkar A., M. P. Paidoussis // In *ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers. – 2002. – P. 1119–1127.
22. Qian, Q. Instability of simply supported pipes conveying fluid under thermal loads / Q. Qian, L. Wang, Q. Ni // *Mechanics Research Communications*. – 2009. – Vol. 36, № 3. – P. 413–417.
23. Wang, Zhong-Min. Transverse vibration of pipe conveying fluid made of functionally graded materials using a symplectic method / Zhong-Min Wang, Yan-Zhuang Liu // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – № 298. – P. 149–159.
24. Paidoussis, M. P. Dynamic stability of pipes conveying fluid / M. P. Paidoussis, N. T. Issid. // *Journal of sound and vibration*. – 1974. – Vol. 33, № 3. – P. 267–294.
25. Li, Yun-dong. Vibration analysis of conveying fluid pipe via He's variational iteration method / Yun-dong Li, Yi-ren Yang // *Applied Mathematical Modelling*. – 2017. – № 43. – P. 409–420.
26. Zhou, J. K. Differential Transformation and Its Applications for Electrical Circuits / J. K. Zhou // *Applied Mathematics*. – 1986. – Vol. 7, № 17. – 8 p.
27. Ni, Q. Application of the differential transformation method to vibration analysis of pipes conveying fluid / Ni Q, Zhang ZL, Wang L. // *Applied Mathematics and Computation*. – 2011. – № 217 (16). – P. 7028–7038.
28. Agboola, O. O. Free Vibration Analysis of Euler-Bernoulli beam using differential transformation method / O. O Agboola, J. A. Gbadeyan // *Nigerian Defence Academy Journal of Science and Engineering (AJSE)*. – 2013. – Vol. 7, № 1. – P. 77–88.
29. Bozyigit, B. Differential transform method and Adomian decomposition method for free vibration analysis of fluid conveying Timoshenko pipeline / B. Bozyigit, Y. Yusuf, C. Seval // *Structural Engineering and Mechanics*. – 2017. – Vol. 62, № 1. – P. 65–77.
30. Wang, L. Size-dependent vibration characteristics of fluid-conveying microtubes / L. Wang // *Journal of Fluids and Structures*. – 2010. – Vol. 26, № 4. – P. 675–684.
31. Xia, W. Microfluid-induced vibration and stability of structures modeled as microscale pipes conveying fluid based on non-classical Timoshenko beam theory / W. Xia, L. Wang // *Microfluidics and nanofluidics*. – 2010. – Vol. 9, № 4–5. – P. 955–962.
32. On the stability of a microbeam conveying fluid considering modified couple stress theory / S. Ahangar [et al.] // *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. – 2011. – Vol. 7, № 4. – P. 327.

33. Flexural vibrations of microscale pipes conveying fluid by considering the size effects of micro-flow and micro-structure / L. Wang, H. T. Liu, Q. Ni, Y. Wu // *International Journal of Engineering Science*. – 2013. – Vol. 71. – P. 92–101.
34. FGM-90 / Yamanouchi Masao, Mitsue Koizumi, Toshio Hirai, Ichiro Shiota // *In Proceedings of the First International Symposium on Functionally Graded Materilas, FGM Forum, Tokyo, Japan*. – 1990. – P. 123–130.
35. Loy, C. T. Vibration of functionally graded cylindrical shells / C. T. Loy, K. Y. Lam, J. N. Reddy // *International Journal of Mechanical Sciences* 41. – 1999. – № 3. – P. 309–324.
36. Librescu, Liviu. Spinning thin-walled beams made of functionally graded materials: modeling, vibration and instability / Liviu Librescu, Sang Yong Oh, Ohseop Song // *European Journal of Mechanics A/Solids*. – 2004. – Vol. 23, № 3. – P. 499–515.
37. Hossein, M. Thermomechanical stability analysis of functionally graded thin-walled cantilever pipe with flowing fluid subjected to axial load / M. Hosseini, S. A. Fazelzadeh // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. – 2011. – Vol. 11, № 3. – P. 513–534.
38. Yang, FA. Couple stress based strain gradient theory for elasticity / FA Yang, AC Chong, DC Lam, P. Tong // *International Journal of Solids and Structures*. – 2002. – Vol. 39, № 10. – P. 2731–2743.
39. The modified couple stress functionally graded Timoshenko beam formulation / M. Asghari, M. Rahaeifard, M. H. Kahrobaiyan, M. T. Ahmadian // *Materials & Design*. – 2011. – Vol. 32, № 3. – P. 1435–1443.
40. Reddy, J. N. Microstructure-dependent couple stress theories of functionally graded beams / J. N. Reddy // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2011. – Vol. 59, № 11. – P. 2382–2399.
41. Size dependent buckling analysis of functionally graded micro beams based on modified couple stress theory / Alireza Nateghi, Mazaher Salamatlab, Javad Rezapour, Behrouz Daneshian // *Applied Mathematical Modelling*. – 2012. – Vol. 36, № 10. – P. 4971–4987.
42. Size-dependent vibration and instability of fluid-conveying functionally graded microshells based on the modified couple stress theory / R. Ansari, R. Gholami, A. Norouzzadeh, S. Sahmani // *Microfluidics and nanofluidics*. – 2015. – Vol.19, № 3. – P. 509–522.
43. Akgöz, Bekir. Free vibration analysis for single-layered graphene sheets in an elastic matrix via modified couple stress theory / Bekir Akgöz, Ömer Civalek // *Materials & Design*. – 2012. – Vol. 42. – P. 164–171.
44. Akgöz, Bekir. Free vibration analysis of axially functionally graded tapered Bernoulli–Euler microbeams based on the modified couple stress theory / Bekir Akgöz, Ömer Civalek // *Composite Structures*. – 2013. – № 98. – P. 314–322.
45. Setoodeh, A. R. Nonlinear dynamic analysis of FG micro-pipes conveying fluid based on strain gradient theory / A. R. Setoodeh, Afrahim S. // *Composite Structures*. – 2014. – № 116. – P. 128–135.

46. Deng, Jiaquan. Size-dependent vibration analysis of multi-span functionally graded material micropipes conveying fluid using a hybrid method / Jiaquan Deng, Yongshou Liu, Wei Liu // *Microfluidics and Nanofluidics*. – 2017. – Vol. 21, № 8. – P. 133.

47. Основные свойства собственных колебаний протяженного участка трубопровода / Л. Д. Акуленко, М. И. Иванов, Л. И. Коровина, С. В. Нестеров // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. – 2013. – № 4. – С. 119–134.

48. Акуленко, Л. Д. Спектр поперечных колебаний участка движущегося стержня при воздействии продольной нагрузки / Л. Д. Акуленко, Д. В. Георгиевский, С. В. Нестеров // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. – 2015. – № 2. – С. 139–144.

49. Ахтямов, А. М. Идентификация неупругих видов закреплений трубопроводов / А. М. Ахтямов, В. Р. Шагиев // *Вестник Башкирского университета*. – 2016. – Т. 21, № 1. – С. 21–26.

50. Шагиев, В. Р. Идентификация закрепления трубопровода с использованием минимального количества собственных частот / В. Р. Шагиев, А. М. Ахтямов // *Математические структуры и моделирование*. – 2018. – № 1(45). – С. 95–107.

51. Ахтямов, А. М. О единственности решения и корректности задачи определения параметров закрепления трубы с текущей в ней жидкостью / А. М. Ахтямов, Г. Ф. Сафина // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2016. – Т. 57, № 2(336). – С. 32–45.

52. Василевич, Ю. В. Виброизоляция зданий, подвергающихся интенсивным вибрационным воздействиям // Ю. В. Василевич, В. В. Можаровский // *Проблемы современного строительства: сборник БНТУ*. – 2021. – С. 43–47.

53. Киргинцева, С. В. Реализация расчета напряженно-деформированных состояний упругих тел из композитов с покрытиями / С. В. Киргинцева // *Творчество молодых' 2021: сборник научных работ студентов и аспирантов УО «ГГУ им. Ф. Скорины» / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины*. – Гомель, 2021. – Ч. 1. – С. 216–218.

54. Можаровский, В. В. Прикладная механика слоистых тел из композитов: Плоские контактные задачи / В. В. Можаровский, В. Е. Старжинский. – Минск : Наука и техника, 1988. – 271 с.

55. Можаровский, В. В. Напряженно-деформированное состояние слоистых цилиндрических труб / В. В. Можаровский, С. А. Марьин, Н. А. Марьина // *Вестник ХНТУ*. – 2008. – № 2(31). – С. 304–309.

56. Киргинцева, С. В. Влияние температуры и анизотропии материала на напряженное состояние двухслойных труб, применяющихся при футеровке (технология CIPP) / С. В. Киргинцева // *Творчество молодых' 2022: сборник научных работ студентов и аспирантов УО «ГГУ им. Ф. Скорины» / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины*. – Ч. 1. – Гомель, 2022. – С. 216–220.

57. Shear surface wave propagation in stratified media with slip interfaces / K. B. Ghazaryan; V. V. Mozharovsky; S. V. Sarkisyan; S. K. Ohanyan // International Journal of Materials and Structural Integrity. – 2021. – Vol. 14, № 2/3/4. – P. 120–126.

58. Жуковский, Н. Е. Об гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – Москва-Ленинград, 1949. – С. 525–542.

59. Rahul, Kr. Garg. Analysis of Hydraulic Transients in a Reservoir-Valve-Pipeline Arrangement by Using Method of Characteristics (MOC) / Kr. Garg Rahul, Dr. Arun Kumar // Conference Paper. – April 2018. – 9 p.

60. Можаровский, В. В. Скорость волны при гидроударе и напряженно-деформированное состояние слоистых футерованных труб из ортотропных материалов / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2(51). – С. 44–51.

61. Можаровский, В. В. Влияние расположения волокон в трубе из композита на параметры гидравлического удара / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники, 2023. – № 4(57). – С. 30–35.

Поступила: 14.03.2024