

Отзыв официального оппонента
Вельмисова Петра Александровича
на диссертационную работу Разова Игоря Олеговича
**«Аналитические методы динамического расчета тонкостенных трубопроводов
большого диаметра в виде цилиндрических и тороидальных оболочек при наземном,
частично заглубленном и подземном размещении»**
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.1.9. Строительная механика

Актуальность. Работа посвящена актуальной и сложной проблеме, а именно, исследованию свободных колебаний и динамической устойчивости замкнутых цилиндрических и тороидальных оболочек, находящихся в упругой грунтовой среде. Оболочки подвержены внешним нагрузкам и температурному воздействию, что позволяет сформировать наиболее полную расчетную модель, соответствующую реальным условиям эксплуатации применительно к трубопроводам, используемым в нефтяной и газовой промышленности для транспорта жидкого или газообразного продукта. Разрабатываемые автором аналитические методы динамического расчета могут быть использованы и в других отраслях промышленности, что значительно расширяет область применения полученных решений.

Общая характеристика, структура и завершенность диссертационной работы.

Диссертационная работа изложена на 304 страницах, и состоит из введения, шести глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего 320 наименований. Содержание работы полностью соответствует заявленной специальности 2.1.9. Строительная механика.

Во введении автором обоснована актуальность темы диссертационного исследования, представлен краткий анализ современного состояния исследуемой проблемы на основе обзора научных публикаций. Сформулированы цели, задачи, определен объект и предмет исследования, описана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту. Указан личный вклад автора в результаты исследования.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературных источников по теме исследования и методам определения динамических характеристик стержневых и оболочечных систем при помощи аналитических и численных методов расчета, а также экспериментальных данных. Приведено описание действующих на оболочку нагрузок и воздействий. Сформулированные выводы подчеркивают актуальность и выбранное направление исследований автором.

Вторая глава посвящена вопросам определения частот и форм свободных колебаний тонкостенной замкнутой *цилиндрической* оболочки, взаимодействующей с

упругой грунтовой средой. Описывается сформированная расчетная модель при наземном, частично заглубленном и подземном её размещении с указанием нагрузок и температурного воздействия. Предложенная расчетная модель соответствует прямолинейному участку трубопровода с потоком жидкости или газа (в зависимости от объекта расчета). Сформированы основные уравнения и допущения геометрически нелинейной полубезмоментной теории однородных *цилиндрических* оболочек, которые зависят от способа их размещения в упругой среде и расчетной модели. Расчеты выполнены для стальных и полиэтиленовых (ПЭ) оболочек, определен и исследован спектр частот и форм свободных колебаний, в том числе с учетом сил сопротивления и демпфирующих свойств среды.

Третья глава по структуре и последовательности изложения близка ко второй главе. Здесь рассматривается замкнутая *тороидальная* оболочка, представляющая собой расчетную модель криволинейного участка трубопровода. Уравнения равновесия, система дифференциальных уравнений в усилиях и перемещениях записана в тороидальных координатах. Нагрузки и температурное воздействие аналогично цилиндрической оболочке. В конечном итоге получены решения для определения частот свободных колебаний тороидальной оболочки, позволяющие определить спектр частот при различных волновых числах m и n . Выполнены расчеты для стальных и полиэтиленовых (ПЭ) оболочек, в том числе с учетом сил сопротивления и демпфирующих свойств среды.

Четвертая глава посвящена получению решения для определения частот свободных колебаний двухслойной тороидальной оболочки, где в основу расчета неоднородных (двухслойных) оболочек заложена теория неоднородных изотропных оболочек. Полученные решения позволяют выполнить расчет и определить спектр частот свободных колебаний, как для биметаллических двухслойных оболочек, так и для стальных оболочек с защитным покрытием. Построены графики и выполнен анализ полученных решений.

Пятая глава связана с решением научной проблемы – динамической устойчивости и параметрического резонанса цилиндрических и тороидальных оболочек при нестационарных внешних нагрузках. Полученный метод расчета позволяет произвести оценку динамической устойчивости на основании построенных областей Айнса-Стретта при наземном, частично заглубленном и подземном размещении.

В шестой главе произведено сравнение и сопоставление частных случаев решений, полученных в диссертации, с известными решениями других авторов по стержневой и оболочечной теории, численным методам расчета и экспериментальным данным.

В заключении на основе полученных результатов автор делает выводы о характере работы расчетных моделей в виде цилиндрических и тороидальных (однослойных и двухслойных) оболочек при различных схемах размещения в упругой грунтовой среде при заданных нагрузках и температурном воздействии, а также об особенностях изменения частот и форм свободных колебаний, статической и динамической устойчивости при изменении параметров нагрузок.

Научная новизна диссертационного исследования

В рамках исследования разработана расчетная модель тонкостенного трубопровода большого диаметра, представленного в виде замкнутой цилиндрической или тороидальной (как однослойной, так и двухслойной) оболочки. Модель учитывает различные условия прокладки — наземную, частично заглубленную и подземную, — а также комплексное воздействие эксплуатационных нагрузок и температурного воздействия.

С использованием геометрически нелинейного варианта полубезмоментной теории впервые получены и проанализированы в аналитическом виде дифференциальные уравнения движения для элемента срединной поверхности таких оболочек. Решения учитывают совместное влияние широкого спектра параметров: внутреннего и внешнего давления, демпфирующих свойств окружающей среды, скорости потока транспортируемой жидкости, присоединенной массы, продольной сжимающей силы, температурного воздействия, сил инерции, а также упругого отпора основания.

На этой основе разработаны аналитические методы для определения частот и форм свободных колебаний, а также оценки статической и динамической устойчивости трубопроводов. В частности, предложен метод расчета критических значений продольной сжимающей силы и внешнего давления на основе критерия динамической устойчивости. Для анализа динамической устойчивости используется аппарат уравнений Матье и модифицированные диаграммы Айнса–Стретта, что позволяет прогнозировать параметрический резонанс и определять безопасные режимы эксплуатации.

Установлены и обоснованы критерии применимости оболочечных и стержневых моделей для расчета наименьших частот колебаний, представленные в виде безразмерных параметров L^* и R^* . Это дает возможность выбирать адекватную расчетную схему в зависимости от геометрии, материала и условий эксплуатации. Кроме того, выявлены общие закономерности влияния геометрических параметров, схем прокладки и взаимодействия с упругой средой (угол вдавливания, коэффициент отпора) на частотный спектр и формирование областей динамической неустойчивости при различных нагрузках и температурных воздействиях.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается применением апробированных положений и методов строительной механики и вычислительной математики; сравнением результатов расчета тестовых задач с некоторыми решениями, полученными другими авторами по стержневой и оболочечной теории; сравнением частных случаев полученных в диссертации результатов с расчетным программным комплексом ANSYS; осуществляется при помощи использования инструментария MathCAD 15 при выполнении аналитических преобразований и выполнения расчетов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научные положения и выводы, приведенные в работе, обоснованы анализом состояния вопроса, практической и теоретической проблематики, а также проведенными автором собственными теоретическими исследованиями и разработками, подкрепленными построением графиков значений и таблиц в зависимости от величин внешней нагрузки. Приведённые рекомендации аргументированы, и соответствуют результатам исследования.

Ценность результатов для науки и практики.

Теоретическая значимость работы определяется развитием подхода к расчету тонкостенных трубопроводов на основе геометрически нелинейной полубезмоментной теории оболочек и теории потенциального течения жидкости. Трубопровод большого диаметра рассматривается как цилиндрическая или тороидальная оболочка, для которой разработана модель, учитывающая эксплуатационные нагрузки, температурные воздействия и условия взаимодействия с грунтом (наземная, частично заглубленная и подземная прокладка). Это позволило создать аналитические методы определения частот свободных колебаний и оценки динамической устойчивости рассматриваемого класса конструкций.

Практическая значимость

Практическая значимость работы состоит в разработке инструментария для динамического расчета тонкостенных трубопроводов большого диаметра при взаимодействии с грунтовой средой. Полученные методы позволяют более точно определять спектр частот колебаний и границы динамической устойчивости, что необходимо для отстройки от резонанса и обеспечения безопасной эксплуатации при смене режимов работы перекачивающих установок. В практическую плоскость также выведены критерии выбора расчетной схемы (L^* и R^*), дающие инженеру рекомендации

перехода от стержневых к оболочечным моделям в зависимости от геометрических параметров объекта.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научных изданиях.

По материалам диссертации опубликованы 41 научная статья, в том числе: 19 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 – в научных изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, имеется одна монография.

Соответствие работы паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.1.9. Строительная механика, п.2 – «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета»; п.3 – «Аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях»; п.12 – «Исследование и моделирование нагрузок и воздействий на здания и сооружения».

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации.

Автореферат отражает основные положения диссертации и информацию о работе.

Замечания по работе.

1) В формулах (79), (80) для критического параметра $P_{кр}$ внутреннее давление p^* находится в числителе, увеличивая жесткость. При потере устойчивости по стержневой форме (арочный выброс) внутреннее давление создает дополнительную продольную сжимающую силу (распор) на поворотах трассы, что может снижать устойчивость. В диссертации этот эффект для криволинейных участков не проанализирован.

2) Несмотря на большой объем аналитических формул, в диссертации не представлено алгоритмов или программных модулей (в средах MathCAD/MATHLAB), которые могли бы быть напрямую использованы проектными организациями для расчета спектра частот и проверки динамической устойчивости. Применение громоздких формул в ручном счете затруднительно.

3) Во введении упоминается «сложный комплекс взаимодействия свободных, вынужденных, параметрических, автоколебательных процессов». В диссертации исследованы только свободные и параметрические колебания, автоколебания не рассматривались.

4) Во всех моделях предполагается, что упругий отпор и внешнее давление $q_{с1}$ постоянны по длине оболочки. Для протяженных участков ($L/r > 10-12$) и при наличии локальных нагрузок (просадки) отпор грунта по длине может изменяться, вызывая связь продольных и поперечных форм колебаний. Этот аспект в работе не исследован.

Вместе с тем, указанные замечания носят частный характер и не снижают общего положительного впечатления от диссертационного исследования. Диссертация в целом выполнена на высоком научном уровне, изложена последовательно, оформлена в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Заключение

Диссертационная работа Разова Игоря Олеговича «Аналитические методы динамического расчета тонкостенных трубопроводов большого диаметра в виде цилиндрических и тороидальных оболочек при наземном, частично заглубленном и подземном размещении» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения в области теории и методов расчета колебаний и динамической устойчивости замкнутых цилиндрических и тороидальных оболочек конечной длины при подземном, частично заглубленном и подземном размещении, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Диссертационная работа отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013г.) представленных на соискание ученой степени доктора наук, а её автор Разов Игорь Олегович заслуживает присуждению ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры высшей математики УлГТУ
Email: velmisovpra@mail.ru
Телефон: рабочий 8(8422)778-547

Вельмисов Петр Александрович

24.04.2026г.

Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32; Email: rector@ulstu.ru; Тел. +7 (8422) 43-06-43.

Подпись Вельмисова Петра Александровича заверяю
Ученый секретарь Ученого совета УлГТУ



Фалова О.Е.