

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Разова Игоря Олеговича на тему «Аналитические методы динамического расчета тонкостенных трубопроводов большого диаметра в виде цилиндрических и тороидальных оболочек при наземном, частично заглубленном и подземном размещении», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9 строительная механика

**Актуальность темы** диссертационной работы Разова И.О., посвященной исследованию динамического поведения тонких упругих цилиндрических и тороидальных оболочек, моделирующих трубопроводы различного назначения, обусловлена их широким использованием в различных отраслях современной техники (машиностроение, авиастроение, нефтехимическая и газовая промышленность, строительство). При этом определение частот свободных колебаний и динамической устойчивости тонкостенных трубопроводов является также важной и актуальной задачей, поскольку это является необходимым условием для изучения возможности проявления такого опасного явления как параметрический резонанс.

**Научная новизна.** В рассматриваемой работе разработана группа аналитических методов для исследования колебаний и динамической устойчивости тонкостенных трубопроводов большого диаметра с помощью моделей цилиндрических и тороидальных оболочек при их наземном, частично заглублённом и подземном размещении. Разработанные автором методы основаны на геометрически нелинейной полубезмоментной теории оболочек и позволяют учитывать совместное влияние целого комплекса нагрузок, действующих в процессе эксплуатации, а именно: внутреннее и внешнее давление, упругий отпор и демпфирующие свойства внешней грунтовой среды, присоединённые массы, скорость потока транспортируемой жидкости, продольная сила и температурное воздействие.

**Практическая значимость** заключается в применении полученных методов расчета для определения частот и форм свободных колебаний, статической и динамической устойчивости тонкостенных трубопроводов

большого диаметра, взаимодействующих с упругой грунтовой средой, позволяющих выполнить поверочные расчеты на стадии проектирования и эксплуатации. Наиболее точное определение спектра частот свободных колебаний позволит произвести отстройку системы от резонанса, тем самым повысить надежность конструкций и предотвратить аварийные ситуации. Получены расчетные формулы для определения критических параметров, приводящих к потере статической устойчивости, включая критическое значение параметра продольной сжимающей силы и критическое внешнее давление.

Разработанные аналитические методы могут быть использованы для валидации численных результатов, получаемых с помощью различных программных пакетов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 304 страницах, содержит список использованных источников из 320 наименований.

**Область исследования** и содержание диссертации соответствуют специальности 2.1.9 строительная механика по следующим пунктам паспорта специальности: п.2. Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета и п.3. Аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость, при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях.

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 41 работе, из них 19 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены его цели и задачи, перечислены методы исследования и представлены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов диссертационного исследования на всероссийских и международных научных конференциях.

**В первой главе** приведен обзор основных расчетных моделей, применяемых при исследовании колебаний и динамической устойчивости тонкостенных цилиндрических и тороидальных оболочек. Приведены физико-

механические характеристики материалов, которые использовались при решении задач, рассматриваемых в диссертации. Дано описание внешних нагрузок и воздействий, которые учитывались в расчетных моделях, построенных в рассматриваемой диссертационной работе.

**Вторая глава** посвящена анализу свободных колебаний тонкостенных замкнутых цилиндрических оболочек в упругой среде. Приведены расчетные модели и основные допущения геометрически нелинейной полубезмоментной теории тонких цилиндрических оболочек при различных способах размещения в упругой среде, а именно: при наземном, частично заглубленном и подземном размещении. Определены частоты и формы свободных колебаний цилиндрической оболочки с учетом воздействия окружающего грунта по модели Фусса-Винклера, с и без внутреннего давления от материала, находящегося внутри оболочки, а также с учетом присоединенной массы и демпфирующих свойств среды. Проведены численные расчеты для оболочек, изготовленных из стали и полиэтилена.

**В третьей главе** приведены расчетная модель и основные допущения геометрически нелинейной полубезмоментной теории тонких тороидальных оболочек при различных способах размещения в упругой среде. Определены частоты и формы свободных колебаний тороидальной оболочки с учетом воздействия окружающего грунта, с и без внутреннего давления от материала, находящегося внутри оболочки, изменения температуры, а также с учетом присоединенной массы и демпфирующих свойств среды. Проведены численные исследования влияния различных сочетаний воздействий и условий расположения оболочки.

**Четвертая глава** посвящена анализу свободных колебаний тонкостенных двуслойных тороидальных оболочек, взаимодействующих с упругой средой. Для получения эффективных физико-механических характеристик слоисто-неоднородной оболочки, состоящей из двух разных слоев, использовался простейший метод из курса сопротивления материалов, то есть без учета контактных условий на границе раздела двух слоев. В результате были получены уравнения свободных колебаний и соотношения для частот и форм колебаний, совпадающие с точностью до коэффициентов, с приведенными в главе 3 для однослойной тороидальной оболочки. Проведены численные исследования, аналогичные выполненным в предыдущей главе.

**В пятой главе** проведен анализ параметрических колебаний и динамической устойчивости цилиндрических и тороидальных оболочек в упругой среде при наземном и подземном размещении. Задача была сведена к известному дифференциальному уравнению Матье, классическое решение которого получено Н.Н. Боголюбовым и Ю.А. Митропольским. Заслуга автора диссертации в данном разделе состоит в тщательном численном анализе влияния различных геометрических и физико-механических характеристик оболочек, условий их размещения и заполнения на области динамической неустойчивости.

**В шестой главе** проведено сравнение и сопоставление решений, полученных в главах два-четыре диссертации, с решениями других авторов по стретневой и оболочечной теориям, экспериментальными данными и численными методами расчета при помощи метода конечных элементов.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на международных и российских научных конференциях.

**Соответствие автореферата и публикаций автора требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней.** Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы. Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях в количестве, соответствующем требованиям для докторских диссертаций, указанным в пункте 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ».

#### **Замечания по диссертационной работе и ее оформлению:**

1. Целью данной диссертационной работы являлся количественный и качественный анализ динамического поведения цилиндрических и тороидальных оболочек, взаимодействующих с окружающим грунтом при наземном, частично заглубленном и подземном размещении. При этом автор использует только простейшую инженерную модель Фусса-Винклера. Другие виды контактного взаимодействия оболочки с окружающей средой, учитывающие напряженно-деформируемое состояние на границе раздела «труба-грунт», не обсуждались.

2. При анализе свободных колебаний тонкостенных двуслойных тороидальных оболочек, взаимодействующих с упругой средой, для получения эффективных физико-механических характеристик слоисто-неоднородной оболочки, состоящей из двух разных слоев, использовался простейший метод из курса сопротивления материалов, то есть без учета контактных условий на границе раздела двух слоев. То есть, по сути, исследовалось опять поведение однородной однослойной оболочки, поэтому полученные соотношения в главе 4 полностью повторяют соотношения из главы 3 с точностью до коэффициентов.

На взгляд оппонента, следовало бы рассмотреть более точную постановку этой задачи, то есть учесть условия жесткого или скользящего контакта на границе раздела двух слоев оболочки и на границе раздела внешней поверхности оболочки с окружающей грунтовой средой.

3. При анализе параметрического резонанса автором рассмотрен случай совпадения одной из собственных частот колебаний и частотой изменения внутреннего давления. Однако, в нелинейных цилиндрических оболочках очень часто проявляется другой вид резонанса- внутренний резонанс, который еще может наложиться и на внешний резонанс. Внутренний резонанс – этот резонанс между собственными частотами оболочки, когда одна из частот примерно равна другой, или если собственные частоты кратны между собой. О явлении внутреннего резонанса ничего не упоминается и в обзорной главе. Но может быть, автор рассмотрит такие задачи в своих будущих исследованиях.
4. Анализ динамической устойчивости основан на исследовании уравнения Матье (150) для функции обобщенного перемещения. Однако, в диссертации не показано, каким образом задача свелась к этому уравнению.
5. Для одной и той же величины используются разные обозначения. Например, коэффициент постели, или коэффициент отпора грунта, обозначается через  $k$  в соотношении (4),  $k_0$  в ((14),  $k_{II}$  в (5),  $k_s$  в (37), и далее по тексту обозначения меняются; радиус оболочки обозначается по тексту то как  $R$ , то через  $r$ .
6. Одни и те же обозначения используются для описания разных величин. Так, например, (а)  $k_0$  - коэффициент понижения изгибной жесткости

кривой трубы на стр. 25 в уравнении (10) и коэффициент постели на стр. 26 в соотношении (14);

(б) На стр. 69 в уравнениях (46)  $X_1, X_2, X_3$  - тангенциальные и нормальные составляющие внешней нагрузки, а ниже на той же странице в соотношениях (47) через  $X_1, X_2, X_3$  обозначены инерционные составляющие материала оболочки.

7. Автор неоднократно использует размерность величин не в единицах измерения международной системы СИ (см. стр. 52, 82, 132, 191, 210).
8. Неясно, что имеется в виду под понятием «критерий модальной уверенности», упомянутом на странице 48.
9. Автор иногда использует термины, не являющиеся общепринятыми. Например, «опозитное» направление на стр. 54.
10. В соотношении (103) на стр. 149 складывается глубина заложения в [м] с внешним диаметром трубопровода в [мм].
11. На стр. 256 плотность грунта почему-то приведена в  $\text{Н/м}^3$ .
12. Есть несколько замечаний по оформлению диссертационной работы: (а) пунктуационные ошибки (стр. 5, 6, 8, 9, 100, 151 и др.); (б) в тексте имеются стилистические неточности и опечатки (стр. 8, 18, 22, 26, 52 и др.), (в) имеются опечатки в уравнениях, например, в (105) и (139).

**Общее заключение:** Отмеченные замечания не снижают ценность представленной работы, которая, несомненно, заслуживает положительной оценки.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Диссертация Разова И.О. посвящена исследованию динамического поведения тонких упругих цилиндрических и тороидальных оболочек, моделирующих трубопроводы различного назначения. Диссертантом получены новые теоретические результаты, представляющие существенный вклад в развитие теории динамической устойчивости тонких оболочек. Им внесен значительный личный вклад в решение поставленных задач и проведен их количественный и качественный анализ. Исследования выполнены на высоком научном уровне.

Обобщая вышесказанное и учитывая новизну, теоретическую и практическую значимость проведенных исследований, считаю, что представленная к защите диссертационная работа удовлетворяет всем

требованиям п.9 положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, а ее автор, Разов Игорь Олегович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9 Строительная механика.


*Согласна на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки.*

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук  
(научная специальность 01.02.04 механика деформируемого твердого тела), профессор,  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», заведующий кафедрой высшей математики

Шитикова Марина  
Вячеславовна  
13.05.2026

г. Москва, Ярославское шоссе, 26  
Телефон: 8-910-345-0412  
E-mail: ShitikovaMV@mgsu.ru

Заверяю подпись профессора Шитиковой М.В.

  
Начальник отдела  
кадрового делопроиз-  
водства УРП  
А. В. ПИНЕГИН  
13.05.2026

