



ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор Инженерной школы
д.т.н., профессор

Беккер А.Т.
«05» мая 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» на диссертацию **Серёгина Сергея Валерьевича** «Влияние малой присоединённой массы на собственные частоты и формы колебаний тонких круговых цилиндрических оболочек», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

Актуальность темы исследования для науки и практики

Тонкие цилиндрические оболочки нашли широкое применение в различных областях техники. Это не только трубопроводы разнообразного назначения, но и сложные, порой весьма дорогостоящие инженерные конструкции, состоящие из оболочек, подкреплённых набором, несущих то или иное оборудование и подвергающихся статическим и динамическим воздействиям. Расчёты таких оболочек представляют сложную научно-инженерную задачу. Актуальность диссертационной работы Серёгина Сергея Валерьевича обусловлена необходимостью достоверного расчёта цилиндрических оболочек, несущих на себе некоторое оборудование, на динамические воздействия с целью обеспечения их надёжности при минимальной массе, без избыточных запасов прочности.

Целью работы является аналитическое, численное и экспериментальное исследование рассматриваемой задачи механики оболочек, а именно, исследование недостаточно изученного эффекта влияния малой присоединённой массы на свободные колебания тонких круговых цилиндрических оболочек; развитие положений этого раздела механики деформируемого твёрдого тела; уточнение уже известных решений и получение новых научных результатов на основе предложенной автором математической модели, а также разработка практичес-

ских рекомендаций по их использованию. Решение этой задачи даёт специалистам, проектирующим сложные конструкции, содержащие цилиндрические оболочки, инструмент, позволяющий более адекватно оценивать поведение этих конструкций при динамических, в том числе при циклических воздействиях, уменьшая опасность возникновения резонансных колебаний.

По сравнению с традиционными подходами к решению рассматриваемой задачи, С.В. Серёгин вводит в рассмотрение третью, дополнительную степень свободы, связанную с возможностью радиальных колебаний (растяжения / сжатия оболочки без изменения её круговой формы). В результате взаимодействия этих колебаний с изгибными (образование волн на поверхности оболочки) возникают ранее не изученные эффекты, которые могут оказывать заметное влияние на низшую из собственных частот.

Результаты, полученные в диссертации С.В. Серёгина, и предлагаемые им рекомендации вносят вклад в теорию динамики цилиндрических оболочек, несущих дополнительные сосредоточенные массы.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов, списка литературы и трёх приложений. Её содержание изложено на 120 страницах, включая 45 рисунков и 8 таблиц. Список литературы состоит из 75 наименований. К диссертации на 2 страницах прилагаются два акта внедрения.

Структура диссертации обладает внутренней логикой. Аналитический обзор исследований по тематике диссертации завершается формулировкой направления работы. Во второй главе описывается математическая модель, используемая в диссертации. Далее решается сравнительно простая задача о колебаниях кругового кольца, несущего малую массу (глава 3). Здесь же рассматривается случай, когда кольцо имеет малые синусоидальные отклонения от идеальной круговой формы. Уточнение математической модели привело к результату, противоположному ранее известным решениям: большая из расщеплённых частот равна собственной частоте кольца идеальной формы, а меньшая уменьшается с ростом амплитуды начальных несовершенств. Этот результат не противоречит физическим представлениям. Меньшая из этих двух частот (изгибных колебаний) соответствует случаю, когда форма колебаний приблизительно соответствует косинусоиде, но амплитуда колебаний массы заметно меньше, чем амплитуды других волн. Численное решение дало тот же результат.

Далее (в главе 4) анализируются колебания оболочки конечной длины, в некоторой точке которой закреплена малая дополнительная (присоединённая)

масса. Показано, что меньшая из расщеплённых собственных частот в новом решении, в отличие от традиционного, зависит не только от величины присоединённой массы, как это следует из традиционного решения, но и от параметров волнообразования. Численный расчёт, как и ранее, согласуется с аналитическим решением. Кроме случая, когда масса к оболочке крепится в точке, рассматривается крепление к участку поверхности, что ближе к реальным конструкциям. При этом увеличение площади контакта массы с оболочкой приводит к увеличению меньшей из собственных частот, что можно объяснить местным увеличением жёсткости оболочки (как известно, собственная частота колебаний системы с одной степенью свободы $\lambda = \sqrt{K/M}$, где K – приведённая жёсткость, а M – приведённая масса системы).

Для исследования эффекта влияния присоединённой массы был проведён специальный эксперимент, описанный в главе 5. Эксперимент проводился на трёх металлических образцах. Его результаты в целом соответствуют теоретическим решениям.

Наконец, рассмотрены варианты, когда присоединённая масса равномерно распределена вдоль образующей (глава 6) и по окружности в произвольном сечении по длине оболочки (глава 7). Как и прежде, аналитическое решение дополняется численным по МКЭ.

В заключении приводится сводка полученных результатов.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает результаты диссертационной работы.

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается в совместном учёте изгибных и радиальных колебаний оболочки, несущей малую массу, при точечном или занимающем небольшую площадь контакте. В связи с тем, что тонкие оболочки обладают высокой жёсткостью при равномерном растяжении / сжатии по сравнению с жёсткостью при изгибе, собственная частота радиальных колебаний обычно оказывается значительно выше, чем частота первого тона изгибных колебаний (спектр частот радиальных колебаний сдвинут в область более высоких частот). Для исследователей это служит аргументом в пользу отказа от учёта радиальных колебаний.

С.В. Серёгин развивает новый подход к решению задач динамики оболочек, несущих малую присоединённую массу, предполагающий, что динамическая асимметрия уже при малых амплитудах колебаний оболочек вызывает связь изгибных колебаний с радиальными. На базе нового подхода уточнена математическая модель исследования, в частности, предложено новое аппрок-

симирующее выражение для динамического прогиба оболочки, несущей присоединённую массу, получены новые решения задач влияния малой присоединённой массы на свободные колебания тонких оболочек; установлены новые особенности взаимодействия низкочастотных изгибных колебаний оболочки, несущей присоединённую массу, с высокочастотными радиальными колебаниями; теоретически, численно и экспериментально установлена зависимость основной частоты системы «оболочка–масса» как от величины присоединённой массы, так и от геометрических и волновых параметров оболочки.

Достоверность полученных результатов и выводов

Достоверность и обоснованность научных положений, результатов, выводов и рекомендаций работы подтверждаются корректным применением строго доказанных и проверенных практикой уравнений и методов механики деформируемого твёрдого тела; сопоставлением результатов, полученных аналитическими методами, с результатами конечноэлементного анализа и экспериментальных исследований соискателя, а также с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Значимость для науки и производства полученных результатов

Используемый автором подход позволил получить новые решения задач динамики тонких цилиндрических оболочек, несущих присоединённые массы и имеющих начальные отклонения от правильной круговой формы.

Полученные в диссертации новые теоретические, численные и экспериментальные данные свидетельствуют о более сильном снижении меньшей из расщеплённых собственных частот, а также более значительном расщеплении изгибного частотного спектра оболочки, несущей малую присоединённую массу. Обнаружена дополнительная зона расщепления изгибного частотного спектра, обусловленная наличием неизбежных начальных отклонений от идеальной круговой формы бесконечно длинной оболочки, которая не отражается в теоретических исследованиях, а также изучены условия его возникновения. Эти данные имеют существенное значение для технической теории оболочек.

Установлено, что при некоторых геометрических параметрах оболочки конечной длины, несущей присоединённую массу, частоты и амплитуды радиальных и изгибных колебаний могут быть соизмеримыми. Следовательно, при действии периодических нагрузок, неизбежно возникающих в условиях эксплуатации оболочечных конструкций, нерезонансные зоны, определённые согласно традиционному подходу, могут оказаться резонансными. Даны практические рекомендации по выбору места крепления присоединённой массы для

возможности управления (уменьшения или увеличения) расщеплением изгибного частотного спектра реальной оболочки, нежелательным с точки зрения динамической прочности и надёжности конструкций. Эти результаты представляют практический интерес для специалистов, занимающихся проектированием технических объектов, в конструкцию которых входят тонкие цилиндрические оболочки, несущие на себе элементы оборудования (подводные лодки, самолёты, ракеты, торпеды, некоторые типы подводных аппаратов и др.). Практическое использование результатов диссертационной работы С.В. Серёгина позволяет более точно рассчитывать низшие собственные частоты колебаний оболочек и в некоторых случаях избежать резонансной вибрации.

Замечания по диссертационной работе

В диссертации рассматривается малая присоединённая масса, но нигде не определено, какую массу можно считать малой.

На с. 29 диссертации записано: «Координатные линии x , y , z декартовой системы координат будем совмещать с линиями кривизны срединной поверхности». Фактически координатные линии проводятся в криволинейной системе координат.

На с. 64 диссертации в первом из уравнений (4.1.3) опечатка: дважды повторяется \ddot{a} .

В формуле на с. 64: $\Omega_{n1} = 1/\sqrt{1 + 4M/M_0 \sin^2 \alpha x}$ следовало бы воспользоваться скобками для устранения неопределённости. Иначе $\sin^2 \alpha x$ получается в знаменателе.

На с. 66 и 67 одна за другой следуют фразы, в которых утверждается одно и то же: «Видно, что Ω_{n3} зависит от ε и θ и, практически, не зависит от M/M_0 » и «Частота радиальных колебаний зависит от ε , θ и не зависит от величины присоединенной массы». Их разделяет только рисунок, на котором это показано.

На с. 72 читаем (в редакции соискателя): «Из рис. 4.3 видно, что обе расщепленные частоты уменьшаются, причем большая, снижается незначительно, а меньшая частота, при относительно небольшой присоединенной массе снижается значительно. Так, расщепление частотного спектра найденное МКЭ $\Delta = \Omega_{n2} - \Omega_{n1} = 0,32$ более сильное, чем это показывает традиционное теоретическое решение $\Delta t = \Omega_{n2t} - \Omega_{n1t} = 0,91$. Как это понимать? $0,32 > 0,91$?

Рассматривая вопрос о влиянии площади контакта массы с оболочкой, соискатель не указывает, каким образом эта масса распределена по площади оболочки. Представляется, что линейное распределение (главы 6 и 7), при котором присоединённая масса полностью охватывает одну из координатных линий, существенно отличается от распределения на участке. Здесь важны, во-первых, соотношение между длиной участка и длиной полуволны колебаний, во-вторых, изгибная жёсткость самой массы, которая, судя по диссертации, не

учитывается. Видимо, с этим и связаны различия в поведении оболочек с различным образом закреплёнными массами, отмеченные в выводах соискателя.

В выводах по главе 4 (с. 77), в главе 6 на с. 89, в выводах по диссертации на с. 97 отмечается, что собственные частоты не зависят от окружной координаты места крепления массы. Для круговой цилиндрической оболочки без начальных несовершенств это утверждение тривиально.

При описании экспериментальных исследований соискатель уделяет внимание источникам возможных погрешностей (с. 84), но не указывает, насколько точно определены толщины образцов (которые составляют 0,5 – 1,0 мм) и не присутствует ли разнотолщинность. Вызывает определённое недоумение химический состав образцов. Так, в составе образца 2 (сталь 12ГН2МФАЮ) нет Mn, Ni, V, которые, судя по марке, должны присутствовать, зато имеются Ca (2 %), Na, Zr, K, 0,07 % Cl. Соискатель, правда, делает оговорку (с. 80): «Лишние химические связи, обнаруженные в составе сплавов, обусловлены процедурой снятия защитного слоя с поверхности образцов».

Здесь же говорится: «Модели оболочек устанавливались в специальном зажимном приспособлении, на одном из торцов которых реализованы граничные условия, близкие к жёсткому защемлению, а другой торец свободен от закреплений». Судя по рис. 5.5, жёсткое защемление фактически реализовано не было. Кроме того, в диссертации не комментируется влияние кабеля акселерометра на результаты. Описание полученных результатов весьма скучное, не показаны спектры колебаний.

К сожалению, в диссертации и в автореферате много грамматических и синтаксических ошибок: неверно расставлены запятые (что в ряде случаев может исказить смысл), не согласованы падежи и др. Вот лишь немногие примеры.

С. 6 авторефера, с. 15 диссертации: «Результаты выполненных исследований основываются на строго доказанных, корректно используемых и проверенных практикой уравнений и методов механики деформируемого твердого тела».

С. 6 авторефера, с. 15-16 диссертации: «Международная конференция, приуроченной 75-летию академика В.А. Левина».

С. 8 авторефера: «В (1) $f_1(t)$ и $f_2(t)$ – обобщенные координаты, то есть, в традиционном подходе, континуальная оболочка, сводится к системе с двумя степенями свободы».

С. 20 диссертации: «Интересна работа [42] в которой изучен спектр частот и форм колебаний цилиндрической оболочки, подкрепленной системой стрингеров и несущей сосредоточенно присоединенную массу с учетом внутреннего статического давления».

Несколько раз в диссертации (с. 63, 65, 89, 99, 100) упоминается метод Бубного (вместо И.Г. Бубнова) – Галёркина.

На с. 93, 95, 44, 54, 103 модуль упругости стали считается равным $E = 2 \cdot 10^{11}$ мПа (миллипаскалей!). Эта же величина на с. 69, 73, 84 даётся в Н/м², а на с. 80, 85 – в Па.

П. 12 выводов по диссертации: «Изучена площадь сплошного контакта присоединенной массы с поверхностью оболочки». Очевидно, изучена не площадь, а её влияние.

В оглавлении диссертации отсутствует единство оформления.

Отмеченные недостатки не опровергают основные результаты работы и полученные выводы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты исследований, а также разработанные и зарегистрированные в Роспатенте программы для ЭВМ могут быть использованы в организациях, занимающихся проектированием и расчётом на прочность оболочечных конструкций, применяемых в космической технике, ракетостроении, авиастроении, судостроении и в других отраслях промышленности.

Заключение

Диссертация Серёгина Сергея Валерьевича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития теории динамики тонких цилиндрических оболочек. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные результаты исследования опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Работа отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор **Серёгин Сергей Валерьевич** заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела.

Отзыв на диссертацию и автореферат составил

д.т.н., профессор кафедры кораблестроения и океанотехники

Антоненко Сергей Владимирович

Тел.: 89089734962, E-mail: antonenko48@rambler.ru

Отзыв заслушан и утверждён на расширенном заседании кафедры кораблестроения и океанотехники ДВФУ с представителями кафедры механики и математического моделирования, протокол № 9 от 30 апреля 2015 г.

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ, г. Владивосток).

Адрес: 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.