

На правах рукописи



Мокин Николай Андреевич

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
ВОЗДУХООПОРНЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И  
ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**05.23.17 – Строительная механика**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,

**Мондрус Владимир Львович**

Официальные  
оппоненты:

**Ким Алексей Юрьевич**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.»,  
профессор кафедры «Теория сооружений и  
строительных конструкций»

**Жаворонок Сергей Игоревич**

кандидат физико-математических наук, доцент,  
ФГБУН «Институт прикладной механики Российской  
Академии наук», старший научный сотрудник

Ведущая организация:

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов»**

Защита состоится «10» апреля 2019 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.05, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)», по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (7 корпус МИИТ, Минаевский пер., д. 2, ауд. 7618)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «Российский университет транспорта (МИИТ)» [www.mii.ru](http://www.mii.ru).

Автореферат разослан «6» марта 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Шавыкина Марина Витальевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

В последнее время всё чаще возводятся здания различного назначения, которые можно отнести к текстильной архитектуре, отдельной разновидностью которой и являются воздухоопорные сооружения. Возведение подобных оболочек, поддерживаемых за счет избыточного давления воздуха в подбололочечном пространстве, над теннисными кортами, футбольными полями, баскетбольными и волейбольными площадками, а также легкоатлетическими манежами позволяет использовать их не только в кратковременный летний период, но и в переходные осенне-весенние периоды, а зачастую и зимой. Во многих местах срок службы оболочек данного типа уже превышает 10 лет, а современные материалы позволяют продлить его еще больше (до 30 лет), что становится дополнительным стимулом к распространению воздухоопорных оболочек и текстильной архитектуры в целом.

Однако, имеется и печальный опыт разрушения воздухоопорных оболочек в результате различных причин. Корректное прогнозирование поведения оболочки под действием расчетных нагрузок поможет выработать правильную стратегию их эксплуатации с целью предотвращения повреждения оболочки и нанесения вреда здоровью людей.

Кроме того, в настоящий момент перемещения оболочек подобного типа не нормируются. Желание эксплуатирующих организаций более полного использования подбололочечного пространства (а также отсутствие или несвоевременное срабатывание систем аварийного повышения давления и установка специальных противопожарных ограждений) зачастую приводит к разрушению (раздиру) оболочки от столкновения с расположенными вблизи нее жесткими предметами при больших перемещениях от ветровых порывов.

При действии расчетных нагрузок на воздухоопорные сооружения происходит сложное взаимодействие конструкции с окружающей средой, которое приводит как к изменению формы оболочки, так и к одновременному изменению самой действующей нагрузки по величине и направлению. А поскольку конструкции из тканей и тросов обладают намного большей податливостью, чем сооружения из

традиционных материалов, то для корректного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) воздухоопорных оболочек необходима разработка методики расчета оболочки с учетом ее аэроупругого поведения под действием ветровой нагрузки.

Таким образом, расчёт воздухоопорных сооружений имеет достаточно большую значимость, и методика решения связанных задач требует особой проработки.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Рассмотрены научные работы, посвященные вопросам расчета и проектирования воздухоопорных сооружений, таких отечественных ученых как: С.А. Алексеев, Д.А. Бейлин, А.А. Гогешвили, Б.И. Друзь, И.Б. Друзь, В.Э. Магула, В.В. Ермолов, А.Ю. Ким, П.И. Кононенко, С.Н. Кривошапко, В.В. Михайлов, В.П. Поляков, А.М. Смирнов, В.И. Усюкин, В.А. Хованец, А.В. Чесноков, В.П. Шпаков и др. Среди зарубежной научной литературы исследуемым вопросам посвящены публикации следующих авторов: P. Becarelli, K.-U. Bletzinger, M. Breuer, B.N. Bridgens, E. Haug, C.G. Huntington, K. Ishii, A. Jrusjrunkiat, M. Kassem, S. Kawamura, R.J. Kind, A.M. Kupzok, J. Llorens, T. Matsumoto, M. Mollaert, B.G. Newman, J.T. Oden, E. Onate, F. Otto, S. Reese, N.K. Shrivastava, R. Trostel, J.N. Wood и др. В рамках диссертационного исследования также проведен анализ отечественной и зарубежной нормативной литературы, посвященной расчету воздухоопорных и тентовых сооружений, определению нагрузок и воздействий на них.

### **Цель диссертационной работы.**

Анализ напряженно-деформированного состояния воздухоопорных сооружений и нагрузок, действующих на них, на основе расчетов, проводимых с учетом ортотропии свойств материала оболочки, взаимовлияния деформирования оболочки и действующих нагрузок.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1) Анализ нормативных документов и научно-технической литературы по расчету и проектированию воздухоопорных оболочек.

2) Изучение способов моделирования ветровых нагрузок на здания и сооружения.

3) Изучение математических моделей материала мембранных конструкций и сплошной среды с целью выбора оптимальных моделей как с точки зрения адекватности описания изучаемых явлений, так и с точки зрения устойчивости и скорости вычислительного процесса.

4) Разработка методики расчета воздухоопорных оболочек в двусторонне связанной постановке на действие воздушного потока с использованием современных высокопроизводительных программных средств.

5) Верификация разработанной методики путём решения тестовых (имеющих альтернативное решение) двусторонне связанных задач деформирования упругих конструкций, взаимодействующих с окружающей средой.

6) Расчет воздухоопорных оболочек различной формы на действие внутреннего давления и ветровой нагрузки с использованием разработанной методики, сопоставление результатов с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов.

#### **Научная новизна работы.**

1) Построена корректная математическая модель воздухоопорной оболочки с учетом ортотропии и геометрической нелинейности.

2) Разработана методика расчета воздухоопорных оболочек в геометрически нелинейной постановке с использованием метода конечных элементов и метода конечных объемов на действие ветрового воздействия.

3) Решены задачи деформирования ортотропных воздухоопорных оболочек различной формы под действием внутреннего давления и ветровой нагрузки в двусторонне связанной постановке с использованием разработанной методики.

4) Исследовано влияние величины внутреннего давления на частоты и формы собственных колебаний воздухоопорных оболочек на прямоугольном плане с помощью метода конечных элементов.

### **Теоретическая значимость результатов работы.**

Разработанная методика может быть использована не только для воздухоопорных сооружений строительного назначения, но и для пневматических конструкций в других отраслях.

### **Практическая значимость работы.**

Расчеты сооружений по разработанной методике позволяют подобрать рациональные параметры эксплуатации воздухоопорных сооружений различной формы во время опасных погодных явлений (ураганов и пр.), а также повысить безопасность подобных конструкций. Разработанные рекомендации позволяют оценить прогибы и перемещения воздухоопорных оболочек на прямоугольном плане без проведения трудоемкого и дорогостоящего моделирования двусторонне связанного поведения оболочки путем обоснованного в данной работе уточнения нормативного распределения ветровой нагрузки по поверхности оболочки.

Представленные в диссертационном исследовании результаты могут быть использованы, как проектировщиками воздухоопорных сооружений, так и организациями, осуществляющими их эксплуатацию.

### **Методология и методы исследования.**

- системный анализ;
- методы математической статистики;
- сравнение;
- математическое моделирование;
- вычислительный эксперимент;
- численные методы строительной механики и вычислительной гидродинамики (метод конечных элементов, метод конечных объемов).

### **Положения, выносимые на защиту.**

В соответствии с пунктами паспорта специальности:

(1. Общие принципы расчета сооружений и их элементов, 4. Численные методы расчета сооружений и их элементов)

1) Разработанная методика численного расчета воздухоопорных оболочек в двусторонне связанной постановке на действие воздушного потока на основе метода конечных элементов и метода контрольных объемов.

2) Результаты численного анализа НДС ортотропных воздухоопорных оболочек различной формы под действием внутреннего давления и ветровой нагрузки в связанной двусторонней постановке.

(8. Исследование нагрузок на сооружения)

3) Способ получения уточненной оценки перемещений оболочки на основе несвязанных расчетов.

#### **Достоверность полученных результатов.**

Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается:

- корректностью постановки задач в рамках теоретических предпосылок строительной механики, механики деформируемого твёрдого тела, вычислительной гидродинамики;

- построением корректных математических моделей;

- применением апробированных численных методов и использованием верифицированных программных комплексов;

- сопоставлением результатов численного решения задач с результатами экспериментальных и теоретических исследований других авторов.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- XIX Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, 2016 г.

- Молодежный международный научно-практический семинар молодых ученых и студентов «Современные исследования в области прикладных

инженерных наук», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов», Москва, 2016 г.

- VI Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российская академия архитектуры и строительных наук», Москва, 2017 г.

- XX Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, 2017 г.

- Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию со дня рождения профессора Н.Н. Леонтьева и 110-летию со дня рождения профессора В.З. Власова, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, 2017 г.

- 8-я Международная конференция по текстильным композитным материалам и надувным конструкциям (8th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures) «STRUCTURAL MEMBRANES», Мюнхен, Германия, 2017 г.

### **Публикации.**

Основные положения диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 3 в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.

### **Структура и объем работы.**

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, включающего 12 таблиц, 62 рисунка, список литературы из 152 наименований, в том числе 54 на английском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цели и задачи, описана научная новизна, практическая значимость и апробация работы, перечислены основные публикации по работе, приведены ее структура и объем.

**В первой главе** рассмотрены конструктивные особенности воздухоопорных оболочек, проведен анализ отечественной и зарубежной нормативной документации по проектированию и расчету воздухоопорных и тентовых сооружений, выявлены направления совершенствования существующих нормативных документов.

Вопрос о формообразовании воздухоопорных сооружений рассмотрен в п.1.2, приводится уравнение поверхности мыльной пленки в декартовых координатах, которое позволяет отыскать наиболее рациональную (равнонапряженную) форму оболочки, описаны численные методы для решения задач формообразования, записаны условия отсутствия складок на мягкой оболочке общего вида.

В п. 1.2.4 диссертации рассмотрены основные нагрузки, действующие на воздухоопорные оболочки. Освещен вопрос выбора величины внутреннего давления, а также существующие нормативные рекомендации по его назначению. Снеговая нагрузка для классических подъемистых воздухоопорных оболочек обычно не достигает большой величины, поскольку из-за низкого сопротивления теплопередаче тонкой оболочки снег на оболочке подтаивает и соскальзывает с нее. Однако, в последние годы произошло несколько обрушений воздухоопорных сооружений именно в зимний период, причины опускания были проанализированы по информации из открытой печати. Как правило, причиной обрушения служит недостаточно аккуратная эксплуатация, а также проектные ошибки. Отмечено, что при известных случаях опускания оболочек люди серьезно не пострадали. Далее рассмотрена ветровая нагрузка, действующая на воздухоопорные сооружения, поскольку именно ее изучение представляет наибольший научный и практический интерес. Дело в том, что в связи с существенным деформированием оболочки

распределение нагрузки меняется в процессе нагружения как по величине, так и по направлению. Значит, задача расчета воздухоопорной оболочки на действие ветрового потока является связанной.

Корректное экспериментальное моделирование аэроупругого поведения реальных большепролетных сооружений еще более трудноосуществимо и дорого, чем простой аэродинамический эксперимент, поскольку даже расположение традиционной системы датчиков и измерительных приборов может исказить механическое поведение модели. Поэтому численное (компьютерное) моделирование мягких оболочек в потоке воздуха является актуальным, а в комплексе с экспериментальными исследованиями может существенно помочь в понимании и прогнозировании поведения подобных конструкций под действием ветровой нагрузки, и именно этот вопрос более подробно освещается в главе 4.

В п. 1.3 диссертации приведен обзор работ по аналитическим и численным методам расчета воздухоопорных оболочек. Решения, полученные аналитически для достаточно простых задач, можно использовать для проверки численных методик расчета и используемых моделей. В силу своих преимуществ, описанных в диссертации, для решения задачи о механическом поведении воздухоопорных сооружений выбран метод конечных элементов (МКЭ).

Естественно, приведенный обзор литературы не претендует на исчерпывающую полноту, в нем упомянуты только те работы, которые имеют непосредственное отношение к рассматриваемым в диссертации вопросам.

**Во второй главе** приведены основные этапы и особенности построения численных решений задач механики методом конечных элементов и задач вычислительной аэродинамики методом контрольных (конечных) объемов (МКО).

В разделе 2.1 записаны основные этапы расчета воздухоопорных конструкций с помощью МКЭ. Детально рассмотрены подходы к моделированию технических тканей с покрытием, из которых изготавливаются воздухоопорные оболочки. На основе анализа научной и нормативной литературы, а также результатов экспериментальных исследований, проведенных в том числе и с участием диссертанта, обосновано применение линейно-упругой ортотропной модели

материала воздухоопорной оболочки, как наиболее оптимальной с точки зрения точности и скорости проведения расчетов. Физические соотношения для указанной модели приведены в п. 2.1.2, указывается важность соответствия ориентации осей ортотропии в численной модели и реальной конструкции.

В данной диссертационной работе при решении связанных задач деформирования воздухоопорных сооружений используются метод интегрирования уравнений движения, основанный на неявной схеме, в п. 2.1.3 описаны особенности используемого метода Гильбера-Хьюза-Тейлора (Hilber-Hughes-Taylor, ННТ- $\alpha$  метод).

Далее в работе рассматриваются вопросы экспериментального и численного моделирования обтекания строительных конструкций воздушным потоком. В п. 2.2.1 рассмотрена система уравнений для описания воздушного потока, включающая в себя уравнение состояния идеального газа, законы сохранения массы и количества движения, начальные и граничные условия. Для численного решения системы указанных уравнений в работе используется метод контрольных (конечных) объемов, как правило, с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS-подход). Затем в работе приведены сведения по моделированию турбулентных течений, описаны основные преимущества используемой в расчетах полуэмпирической модели турбулентности  $k-\omega$  SST, разработанной Ф.Р. Ментером.

Наконец, в заключительном разделе главы (п. 2.3) описана методика итерационного решения связанных задач взаимодействия воздухоопорной оболочки с окружающим потоком воздуха с использованием программного комплекса ANSYS.

**В третьей главе** представлены результаты решения тестовых задач по статическому и динамическому расчету изотропных и ортотропных упругих мембран, обтекания вязкой несжимаемой жидкостью недеформируемого цилиндра в двухмерной постановке, а также применение описанной во второй главе методики для численного моделирования сопряженного деформирования упругой

пластины и окружающей ее жидкости в режиме свободных колебаний и при обтекании потоком.

Первый блок задач посвящен решению задач механики, второй – моделированию нестационарного обтекания тела потоком жидкости, третий – решению двусторонне связанных задач. Такой алгоритм верификации позволяет избежать ошибок на каждом этапе решения связанных задач по разработанной методике. Тестовые задачи каждого блока имеют аналитическое, экспериментальное и (или) альтернативное численное подтверждение.

В первом блоке (п. 3.1) рассмотрено статическое деформирование воздухоопорных оболочек различной формы из изотропного материала под действием только избыточного давления воздуха.

Расчеты производились с помощью метода конечных элементов в геометрически нелинейной постановке в программных комплексах (ПК) Лира САПР 2013 и ANSYS. Результаты расчета цилиндрической оболочки со сферическими торцами были сопоставлены с результатами, полученными В.И. Усюкиным методом конечных разностей. Различие результатов не превысило 2,8% по усилиям и 1,9% по перемещениям, следовательно, можно сделать вывод о корректности принятого подхода к моделированию воздухоопорной оболочки. От дальнейшего применения ПК Лира САПР 2013 в данной работе было решено отказаться, поскольку в нем отсутствует возможность назначения мембранным элементам ортотропных механических свойств.

Для корректной оценки собственных частот и форм колебаний воздухоопорной оболочки необходимо учесть не только начальную жесткость системы, но и дополнительную, вызванную эффектом предварительного напряжения за счет внутреннего давления воздуха под оболочкой, поэтому в п. 3.2 описано решение тестовой задачи определения собственных частот и форм колебаний предварительно напряженной ортотропной цилиндрической оболочки (пневмобалки), для которой имеются аналитическое и численное решение, приведенные в работе Arpedo K.L. с соавторами.

Сопоставление результатов, частично показанное на рисунке 1, выявило расхождение между результатами диссертанта и эталонными аналитическими результатами для стержневой модели достигающее 14,3%, а для конечно-элементной модели относительная разница результатов не превышает 1%.

Расхождения результатов с аналитическими расчетами объясняются различным подходом к моделированию концевых участков пневмобалки и упрощениями, принятыми при построении стержневой модели.

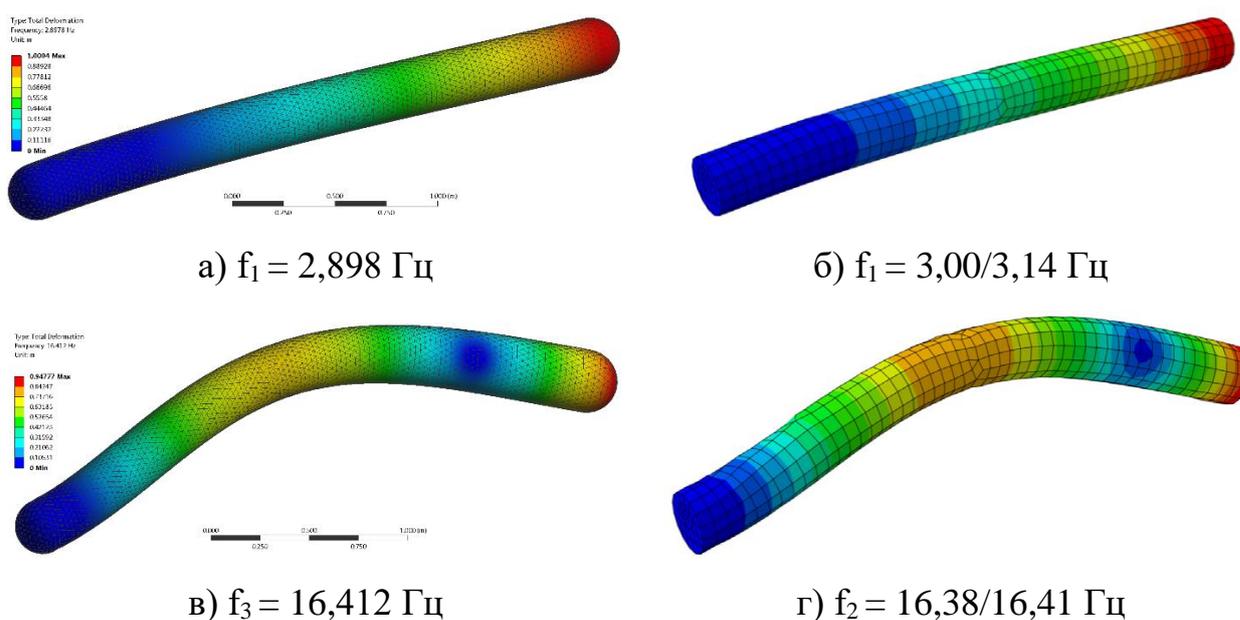


Рисунок 1. Первая (а, б) и вторая (в, г) изгибные собственные формы и частоты колебаний консольной пневмобалки: а), в) – полученные диссертантом; б), г) – численные/аналитические результаты из работы Aredo K.L. и др.

Во втором блоке тестовых задач (п. 3.3) проводится моделирование обтекания цилиндра диаметром 5,5 м вязкой несжимаемой жидкостью в двухмерной постановке методом контрольных объемов (МКО). Численное моделирование выполнено на основе системы нестационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (URANS), записанной в переменных «скорость–давление». Для замыкания осреднённых уравнений использована двухпараметрическая модель турбулентности  $k-\omega$  SST.

Сопоставление результатов (аэродинамических коэффициентов  $C_x$  и  $C_y$ , частоты срыва вихрей  $\nu$  и числа Струхала  $Sh$ ) для различных расчетных сеток,

использованных в данной работе, с эталонными данными из работы Hillewaere J. с соавторами показано в таблице 1.

Таблица 1

| Шифр   | $y_{\max}^+$ | $C_x$<br>ср. | $\Delta$ ,<br>% | $C_y$<br>max | $\Delta$ ,<br>% | $\nu$ , Гц | $Sh$  | $\Delta$ ,<br>% |
|--------|--------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|------------|-------|-----------------|
| 1.1    | 480,6        | 0,498        | 31,7            | 0,351        | 11,9            | 1,748      | 0,302 | 11,1            |
| 2.1    | 248,0        | 0,438        | 14,2            | 0,256        | 15,9            | 1,894      | 0,328 | 3,7             |
| 3.1    | 102,9        | 0,405        | 4,5             | 0,227        | 24,3            | 2,098      | 0,363 | 6,7             |
| 3.2    | 99,5         | 0,418        | 8,3             | 0,288        | 6,5             | 1,923      | 0,333 | 2,2             |
| 4.1    | 51,0         | 0,386        | 1,1             | 0,259        | 14,9            | 2,099      | 0,363 | 6,8             |
| Эталон | 97           | 0,420        | 8,8             | 0,310        | 0,0             | 1,850      | 0,320 | 5,9             |
|        | 4            | 0,390        | -               | 0,310        | -               | 1,966      | 0,340 | -               |

Результаты получены для различных расчетных сеток и сопоставлены с численными решениями других исследователей, а также экспериментальными данными из литературы. Расхождения результатов для наилучшей модели под шифром 3.2, использованной диссертантом, не превысили 10%. Можно заключить, что тестовая задача по обтеканию цилиндра воздушным потоком решена успешно.

В третий блок вошли две похожие двусторонне связанные задачи о деформирования вертикальной закрепленной снизу упругой пластины, взаимодействующей с окружающей жидкостью. Эталонные решения описаны в работе Glück M. с соавторами и подтверждаются результатами других исследователей.

В первом случае рассмотрены свободные затухающие колебания упругой пластины, расположенной в вязкой несжимаемой жидкости. Проанализированы случаи различной вязкости жидкости  $\mu$ , что приводило к различной скорости затухания (см. рисунок 2), кроме того частоты свободных колебаний сопоставлены с собственными частотами пластинами.

Во втором случае рассмотрена задача о деформировании упругой пластины стационарным потоком вязкой несжимаемой жидкости. Такая постановка задачи весьма сходна с той, которая используется в четвертой главе при расчете воздухоопорных оболочек на действие воздушного потока.

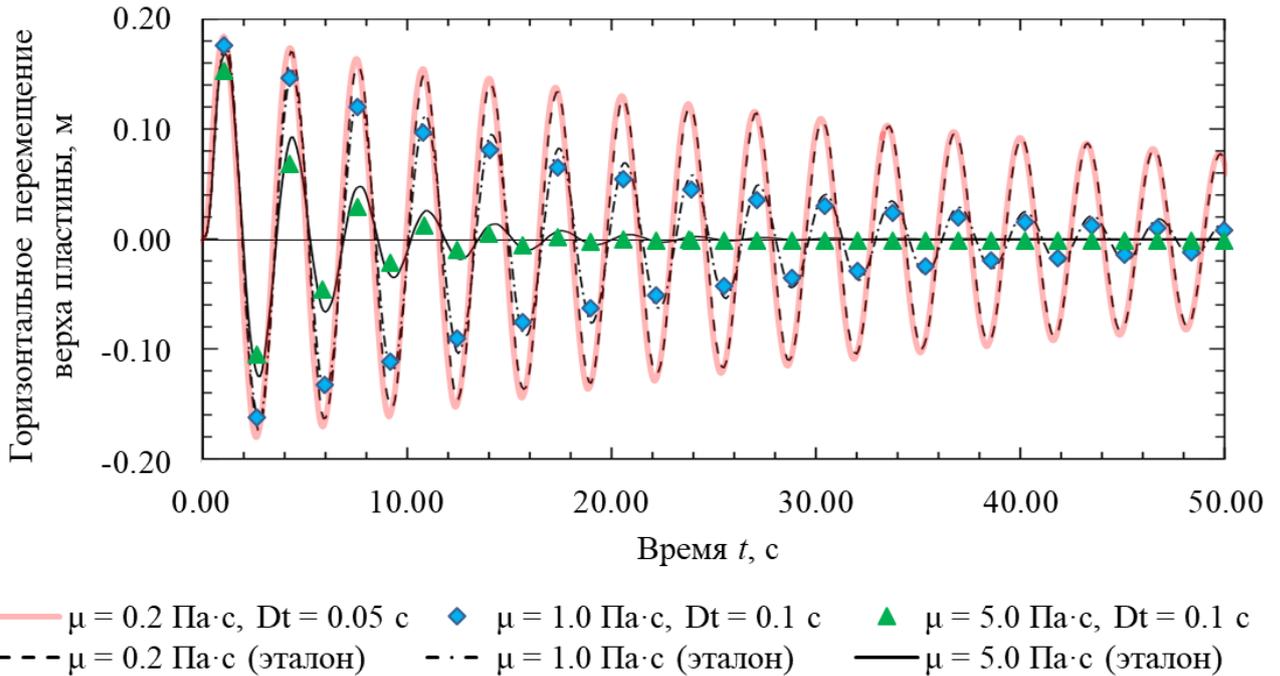


Рисунок 2. Результаты расчета перемещений незакрепленного края пластины для различных величин динамической вязкости жидкости  $\mu$

Поскольку перемещения пластины достигают существенной величины по сравнению с ее толщиной, задача рассматривалась в геометрически нелинейной постановке. В эталонном численном решении были рассмотрены пластины различной толщины. Поскольку поток жидкости являлся ламинарным ( $Re = 50$ ) и стационарным, то сопоставлялись величины установившихся горизонтальных перемещений незакрепленного края пластины  $X_B$  (см. таблицу 2). Амплитуда колебаний в переходном процессе и скорость затухания колебаний не сопоставлялась, поскольку неизвестна была скорость приложения нагрузки в эталонном расчете.

Таблица 2

| Толщина пластины, мм | Горизонтальное перемещение $X_B$ , м ( $t = 3 \text{ с}$ ) |          |            |        | $\Delta$ , % |
|----------------------|--|----------|------------|--------|--------------|
|                      | 7700 КО  | 29500 КО | 118 800 КО | Эталон |              |
| 3                    | 0,5701   | 0,57204  | 0,57532    | 0,586  | 1,86         |
| 4                    | 0,3754   | 0,37677  | 0,37901    | 0,361  | 4,99         |
| 10                   | 0,0363   | 0,03649  | 0,03656    | 0,034  | 7,53         |

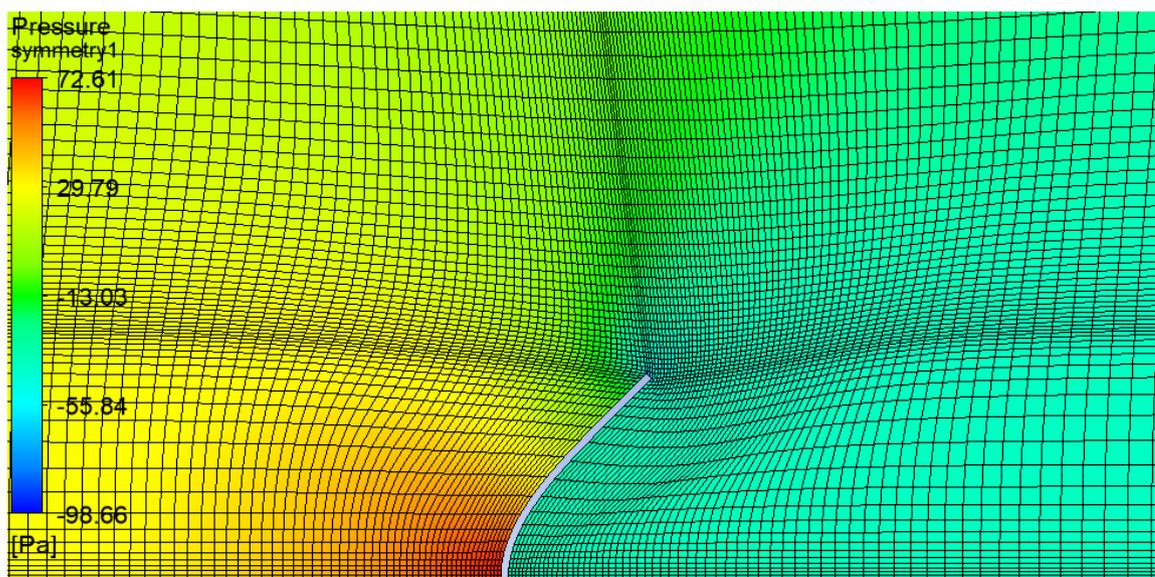


Рисунок 3. Изополе давления жидкости и расчетная сетка размерностью 29500 КО для пластины толщиной  $h = 3$  мм в момент времени  $t = 3$  с

Различие в результатах с эталонным источником не превышает 8%, что можно считать удовлетворительным результатом.

Кроме этого было проведено моделирование изгиба пластины с помощью передачи нагрузки из расчета обтекания недеформируемой пластины. Данный расчет показал, что решение задачи в двусторонне связанной постановке может существенно (в рассмотренной задаче – на 67%) отличаться от результатов расчета при односторонней передаче нагрузки, тем самым показана важность учета существенного изменения формы конструкции при ее взаимодействии с потоком жидкости.

Таким образом, результаты, полученные диссертантом для каждого блока задач, подтвердили корректность используемых подходов к решению рассмотренных классов задач.

**В четвертой главе** решаются связанные задачи деформирования воздухоопорных оболочек сферической формы и на прямоугольном плане, расположенных в воздушном потоке, а также определены собственные частоты и формы колебаний для оболочки на прямоугольном плане при различных значениях внутреннего давления. Проанализировано влияние направления ветрового потока

и соотношения внутреннего давления и скоростного напора ветра на податливость воздухоопорных оболочек на прямоугольном плане.

Задача обтекания сферической оболочки (п. 4.1) была выбрана в связи с тем, что для нее имеются описанные в литературе достаточно полные результаты экспериментальных исследований, что позволило проверить и отработать используемую методику решения связанных задач.

Показано, что учет деформаций оболочки приводит к изменению распределения аэродинамического коэффициента и, как следствие этого, изменению напряженно-деформированного состояния оболочки. На рисунке 4 показано распределение величины  $C_p$  в плоскости главного меридиана без учета (а) и с учетом (б) деформаций оболочки.

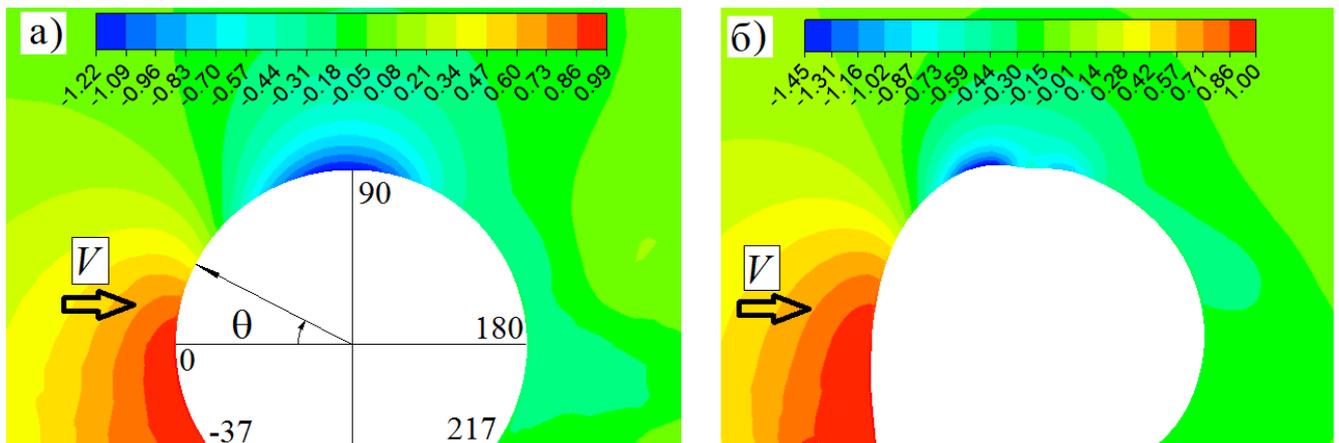


Рисунок 4. Распределение аэродинамического коэффициента  $C_p$  в плоскости главного меридиана: а) Несопряженный (1-way FSI); б) Двусторонне-сопряженный расчет (2-way FSI)

Кроме того, были получены решения задачи для различных моделей турбулентности. Результаты расчета показали, что наиболее близкие результаты к экспериментальным данным обеспечивается при использовании двухпараметрической модели турбулентности Ф.Р. Ментера  $k-\omega$  SST.

Далее была решена задача по отысканию рациональной формы оболочки на прямоугольном плане размерами 20x50 м (п. 4.2.1), рациональность выбранной формы подтверждена расчетом на действие внутреннего избыточного давления. Отмечено, что более подъемистая оболочка (высотой 10 м) менее устойчива к

ветровым нагрузкам, поскольку вблизи опорной зоны она имеет практически вертикальные участки. Оболочка меньшей высоты (8,6 м) более устойчива, при том, что подоболочечное пространство уменьшается, в основном, в верхней части. Данная форма оболочки использовалась для дальнейших численных расчетов.

Корректность модели оболочки при динамических расчетах была проверена при численном исследовании собственных частот и форм колебаний воздухоопорной оболочки (п. 4.2.3). Выявлена практически линейная зависимость между величиной внутреннего давления и квадратами собственных частот, что соответствует информации из литературных источников для изотропных мембран.

В п. 4.2.4 данная модель воздухоопорной оболочки на прямоугольном плане была использована для проведения расчетов обтекания оболочки потоком воздуха при различных углах скольжения  $\alpha$  (рассмотрены углы  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $30^\circ$ ), на сетках различной размерности и при различных значениях коэффициента  $\psi$ , выражающего соотношение внутреннего избыточного давления  $p$  и скоростного напора ветра  $q$ , т.е.  $\psi = \frac{p}{q}$ .

В работе получен интересный результат: наибольшее горизонтальное перемещение, полученное для случая  $\alpha = 30^\circ$ , равно  $f = 1,2686$  м (см. рисунок 5), что больше, чем перемещение  $f = 1,242$  м, полученное при  $\alpha = 0^\circ$ .

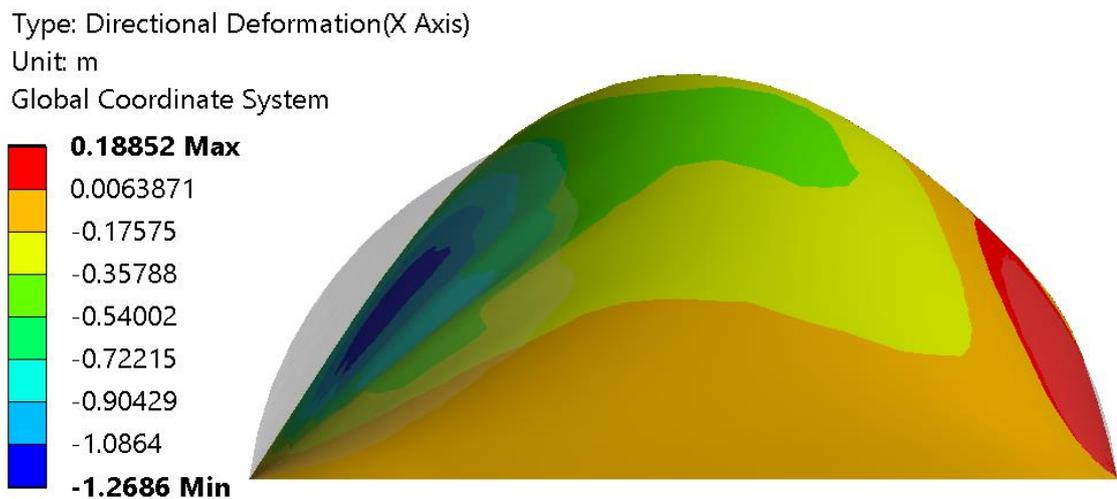


Рисунок 5. Карта горизонтальных перемещений оболочки, нанесенная на деформированную поверхность оболочки (в истинном масштабе),  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\psi = 0,39$  (модель 1.8). Серым цветом обозначена исходная поверхность

Заметим, что величины напряжений при ненулевом угле скольжения также отличаются в большую сторону. Следовательно, необходимо проводить расчеты оболочек на действие ветра также и при ненулевом угле скольжения  $\alpha$ .

При  $\psi < 1,0$  форма оболочки существенно искажается, поэтому распределение аэродинамического коэффициента давления  $C_p$  также изменяется. На рисунке 6 показаны графики аэродинамического коэффициента давления  $C_p$  в центральном поперечном сечении для оболочки, рассчитанной без учета деформаций («No FSI»), в двусторонне связанной постановке при  $\psi = 0,39$  (в трехмерной и квазидвухмерной (2d FSI) постановке). Там же приведены данные экспериментальных исследований Л. Виттинга обтекания цилиндрической оболочки при  $\psi = 0,428$  («Эталон»).

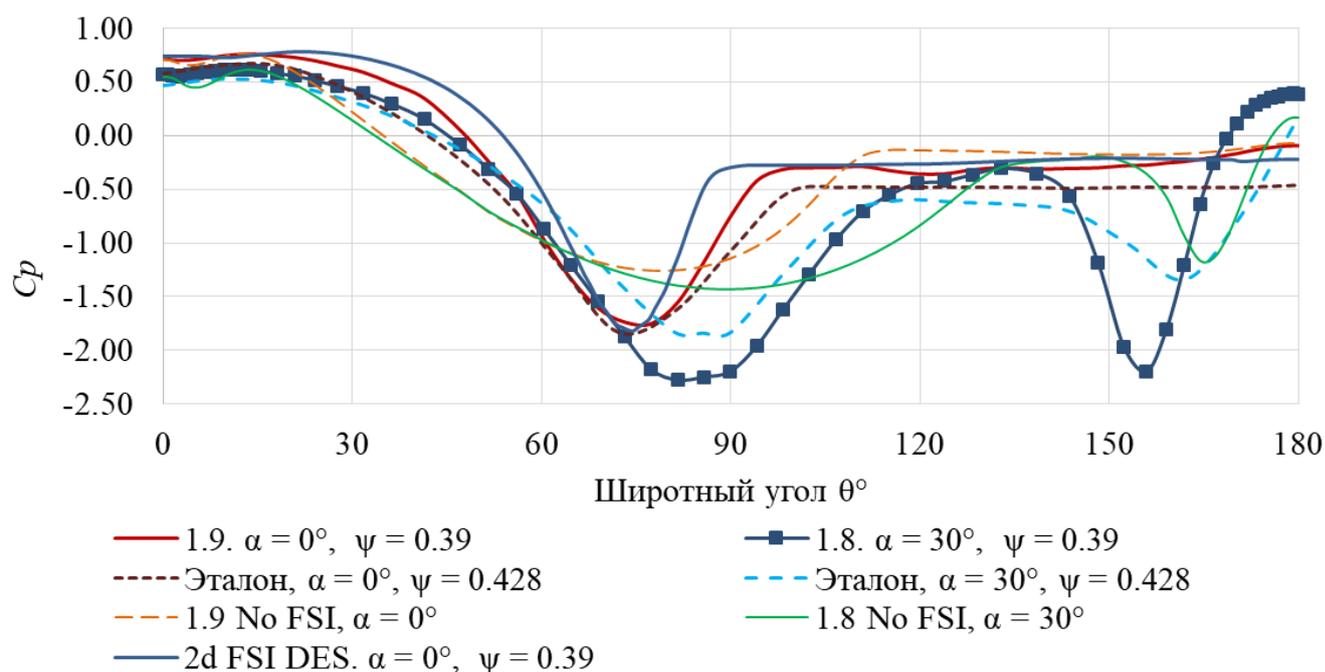


Рисунок 6. Аэродинамический коэффициент давления  $C_p$

В качестве упрощенного подхода для анализа аэроупругих перемещений оболочки предлагается производить расчет оболочки на действие внешней нагрузки, соответствующей картине распределения давления, полученной в результате двусторонне связанного расчета или эксперимента. Упрощение состоит в том, что расчет производится в несвязанной постановке. При таком подходе перемещение составило  $f = 1,3141$  м, что отличается от результатов расчета в связанной постановке на 5,4%.

Кроме того, для исследованной в работе оболочки предложена формула для предварительной инженерной оценки максимальных горизонтальных перемещений  $f$ :

$$f = 0,06 \frac{q}{p} r,$$

где  $r$  – средний радиус кривизны центрального поперечного сечения оболочки в начальном состоянии, м

На основе проведенных расчетов составлены рекомендации (п. 4.3) в нормативные документы по проектированию воздухоопорных сооружений, которые, по мнению диссертанта, позволят повысить точность расчетов и безопасность эксплуатации воздухоопорных сооружений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты работы:

1. Построена корректная математическая модель воздухоопорной оболочки с учетом ортотропии и геометрической нелинейности.

2. Разработана методика расчета воздухоопорных оболочек в геометрически нелинейной постановке с использованием метода конечных элементов и метода конечных объемов при обтекании оболочки потоком воздуха.

3. Выполнена валидация и верификация предложенной методики на модельных задачах, для которых в научной литературе представлены результаты экспериментальных исследований.

4. Исследовано влияние величины внутреннего давления на частоты и формы собственных колебаний воздухоопорных оболочек на прямоугольном плане с помощью метода конечных элементов.

5. Решены задачи деформирования ортотропных воздухоопорных оболочек различной формы при действии внутреннего давления и внешнего потока воздуха в двусторонне связанной постановке с использованием разработанной методики.

6. Представленные в диссертационном исследовании результаты могут быть использованы как проектировщиками воздухопорных сооружений, так и организациями, осуществляющими их эксплуатацию.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:**

1) Проведение расчетов обтекания воздухопорных оболочек с учетом окружающей застройки и уточненных характеристик турбулентности набегающего потока.

2) Проведение численного моделирования сжатого воздуха, расположенного в подоболочечном пространстве воздухопорных оболочек с применением метода конечных объемов.

3) Численное моделирование оболочек с тросовым усилением, а также с учетом наличия сварных и монтажных швов.

#### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

**Публикации в российских рецензируемых научных журналах согласно перечню ВАК:**

1. **Мокин Н.А.** Проведение нелинейных расчетов воздухопорных оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. №2. С. 24-33.

2. Ибрагимов А.М., Кустов А.А., **Мокин Н.А.** Экспериментальное и численное исследование напряженно-деформированного состояния технической ткани с покрытием, работающей в составе строительной конструкции в форме гиперболического параболоида // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 7. С. 35-42.

3. **Мокин Н.А.**, Кустов А.А., Ганджунцев М.И. Численное исследование собственных частот и форм колебаний воздухопорных сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 337–347.

**Публикации в изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS:**

4. **Mokin N.A.**, Kustov A.A., Trushin S.I. Numerical simulation of an air-supported structure in the air flow // 8th International Conference on Textile Composites and

Inflatable Structures - STRUCTURAL MEMBRANES 2017, p. 383-393 (октябрь 2017 г.).

5. Kustov A.A., **Mokin N.A.**, Ibragimov A.M. Mechanical properties of technical coated fabrics under axial and off-axial tensile tests // 8th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures - STRUCTURAL MEMBRANES 2017, p. 100-111 (октябрь 2017 г.).

**Публикации в других изданиях:**

6. Кустов А. А., **Мокин Н.А.**, Трушин С.И. Численное моделирование мембраны воздухоопорных сооружений.// Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы [Электронный ресурс]: сборник докладов и тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения профессора Н.Н. Леонтьева и 110-летию со дня рождения профессора В.З. Власова (г. Москва, 21 июня 2017 г.) / под общей ред. В.Л. Мондруса ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. – Электрон. дан. и прогр. (10 Мб). — Москва: Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2017. С. 72-73

7. **Мокин Н.А.** Численное моделирование взаимодействия воздухоопорной оболочки с потоком воздуха.// Строительство – формирование среды жизнедеятельности [Электронный ресурс]: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля 2017 г., Москва) / М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. – Электрон. дан. и прогр. (73,7 Мб). – Москва: Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2017. С. 337-339.

8. **Мокин Н.А.** Анализ напряженно-деформированного состояния воздухоопорных сооружений под действием избыточного давления. // Строительство – формирование среды жизнедеятельности [Электронный ресурс]: сборник материалов XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (27–29 апреля 2016 г., Москва) / М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. – Электрон. дан. и прогр. (46,6 Мб). – Москва: НИУ МГСУ, 2016. С. 352-355.