

## ОТЗЫВ

на диссертацию Мокина Николая Андреевича «Численный анализ деформирования воздухоопорных оболочек при статических и динамических воздействиях», представленную в диссертационный совет Д 218.005.05 «Российского университета транспорта (МИИТ)» к публичной защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – Строительная механика.

### Актуальность темы диссертации.

Возведение воздухоопорных оболочек над складами и гаражами, а также над теннисными кортами, футбольными стадионами и другими спортивными сооружениями позволяет использовать их в течение всего календарного года. Срок службы тканевых оболочек составляет 10 лет, а при использовании дорогостоящих синтетических материалов он стал доходить до 25-30 лет.

Легкие сооружения быстро окупали себя, но быстро и разрушались. Так, около половины построенных воздухоопорных сооружений преждевременно разрушилось от ураганного ветра и тайфунов, а часть сооружений - от действия снега, таявшего при смене температуры и превращающегося в лед. Другие причины разрушения покрытий – отключение системы постоянной подачи воздуха под оболочку и отсутствие противопожарных ограждений. Тайфуны действуют на оболочку как на выпуклое крыло, выдергивают его анкерные крепления и уносят оболочку на дальнюю территорию. Отключение электроэнергии при ураганах всегда приводит к нарушению несущей способности воздухоопорных сооружений, а отрицательный опыт применения их на военных базах в качестве медсанбатов или укрытий для дорогостоящей военной техники заставил взглянуть на воздухоопорные сооружения как на объекты только для увеселительных и спортивных развлечений солдат. Инженерам стало ясно, что воздухоопорному сооружению нужны прочные стены хотя бы двухметровой высоты, а покрытие должно быть способным нести себя и без постоянной подкачки воздуха под покрытие.

Много выявилось и других недостатков у тканевых сооружений. Сгорают они за одну минуту. Кроме того, зимой в таких сооружениях холодно. Но инженеры понимали, что отказываться от воздухоопорных сооружений нельзя. Легкие сооружения являются мобильными. Так, сооружения для ремонта самолетов можно построить за один день. США, к примеру, выполнены разработки по воздухоопорным сооружениям на два миллиарда долларов. Насколько за счет воздухоопорного эффекта может быть увеличена несущая способность большепролетных покрытий сооружений?

Исследования показали: примерно в три раза. Причем речь идет о сопоставлении с традиционными покрытиями сооружений.

Судя по названию диссертации, работа соискателя посвящена исследованию воздухоопорных систем, но, в действительности, в диссертации рассматривается довольно широкий круг проблем.

### **Основное содержание диссертации.**

Рецензируемая диссертация состоит из четырех глав. Первая глава – обзор исследований ученых по исследуемой теме. Обзор сделан хорошо. Вообще-то обзор исследований ученых соискателем посвящена не первая глава, а вся диссертация. Даже в основных главах диссертации автор не приводит тех алгоритмов, которыми пользуется, а только описывает их словами и делает ссылки на ту литературу, где они приводятся. Но исторически это объяснимо. Строительная механика развивается быстро и становится междисциплинарной. Разрабатываемые учеными алгоритмы становятся универсальными, и в тоже время они известны ученым. Но из-за громоздкости известные алгоритмы решения задач полностью уже не приводятся в диссертациях, а приводятся кратко, но с обязательными ссылками на первоисточники. По этой причине отсутствие алгоритмов в диссертации я не стал рассматривать как недостаток. Это скорее современная тенденция, не придерживаясь которой со временем будет все труднее.

Вторая глава диссертации, практически также обзорная. Но в ней соискатель излагает словами те известные методы и методики, при помощи которых им решаются задачи, результаты которых приведены им в третьей главе и частично в четвертой. В третьей главе соискателем решаются две задачи: 1) Статический расчет воздухоопорной системы сооружения.

2) Малые собственные колебания воздухоопорной системы.

Но решение задачи статики выполнено на том уровне, который был принят в послевоенные годы двадцатого века. Так, автором сначала определяются силы натяжения ткани воздухоопорной системы на конечной стадии монтажа. При этом выпуклая оболочка сооружения накачивается избыточным давлением воздуха, равным 150 Па на стадии формообразования, или (400-800) Па на конечной стадии монтажа. Но если к исследованию принять систему с избыточным давлением 150 Па, то в этом случае на тканевую оболочку сверху может действовать нагрузка, равная лишь 15 кг на один кв. м. Если при этом внешняя нагрузка больше, то выпуклая оболочка заработает на сжатие и выключится из работы. Но главное то, что с точки зрения строительной

механики воздухоопорная гибкая мембрана при малом избыточном давлении воздуха снизу вообще не может быть рассчитана на внешнюю нагрузку, так как в кинематическом отношении она недостаточно удалена от геометрически изменяемой системы и не приблизилась к мгновенно жесткой системе. Определитель такой системы слишком близок к нулю. Соискателем определены продольные усилия в ткани. Далее во второй главе соискатель приводит расчет, выполненный в шестидесятые годы Алексеевым С.А. методом сеток. Алексеев рассчитывает воздухоопорную оболочку на статическое действие нагрузок без учета влияния упругой работы избыточного давления воздуха. При статических расчетах воздухоопорных систем нет необходимости учитывать влияние работы избыточного давления воздуха внутреннего помещения сооружения, так как использование шлюзов не гарантирует герметичности помещения из-за утечек воздуха. Большими же динамическими нагрузками Алексеев С.А. не занимался.

Что касается статических нагрузок: силовой, температурной, кинематической и других, то они соискателем в задаче статики воздухоопорных систем вообще не рассматривались. Давление воздуха 150 Па – это 15 кг на квадратный метр. Давление воздуха 400 Па – это, к примеру, снеговая нагрузка равная 40 кг на один кв. метр. А ведь нормативная снеговая нагрузка в России: 100 кг, 200 кг, 300 кг на кв. м. и т.п. в зависимости от климатической зоны. При переходе к капитальным сооружениям с этим придется считаться. Конечно, и тканевое воздухоопорное сооружение, например, в Африке, может служить тентом, укрывающим людей от жаркого солнца или дождя.

Но сейчас важно научиться проектировать воздухоопорные системы при действии тайфунов. Большие ветровые нагрузки сильно деформируют выпуклую оболочку, что можно видеть хотя бы на фотографиях специализированного уфимского КБ. Внутреннее помещение воздухоопорной оболочки с закрытыми шлюзами при этом срабатывает как герметичная полость, и упругая работа сил давления сильно влияет. Выпуклая оболочка при быстрых воздействиях, если и не успевает разорваться, то через секунду выдергивается вместе с анкерами и улетает как футбольный мяч на другой конец поля.

Большинству ученых безразлично, сослались на его работы или нет. Я не исключение. Но для соискателя опрометчиво было невнимательно просмотреть мою работу, отмеченную в его библиографическом списке под номером [44]. Дело в том, что в этой работе я (по крайней мере, на 90 %) изучал не воздухоопорные сооружения, а линзообразные мембранно-пневматические покрытия сооружений, и там мною

впервые учтена упругая работа избыточного давления воздуха. Линзообразная система покрытия представляет собой две мембраны с закаченным между ними воздухом избыточного давления (по величине большего, чем в воздухоопорных куполах). Во внутреннем же помещении такого сооружения избыточное давление воздуха вообще отсутствует. Несущая способность линзообразных систем такова, что они способны воспринимать снеговую нагрузку за полярным кругом. Линзообразные системы пологие и способны выдерживать ураганы. При пролетах порядка 100-150 метров эта система имеет полость между линзами высотой не более 10 метров. Мембраны, как правило, стальные или алюминиевые. Они дешевле, чем фторсодержащие полимеры (тефлон, фэбрасорб, ширфилл и др.). Такие сооружения капитальные. По экономичности они примерно в три раза превосходят традиционные стальные покрытия сооружений. Если бы соискатель внимательно ознакомился с работой [44], то он решил бы задачу статики и динамики воздухоопорной системы в третьей главе на высоком уровне, а не только писал бы об этом.

Соискатель не понял, что в докторской диссертации оппонента и в ряде его последующих статей разработан усовершенствованный итерационный метод приращений параметров с поэтапным применением на шаге варьирования параметров метода конечных элементов, численной процедуры Эйлера-Коши и универсального уравнения состояния газа. Основанные на новом методе методики статического и динамического расчета линзообразных и некоторых других мембранно-пневматических систем сооружений по континуальным и дискретным расчётным схемам впервые позволили рассчитать линзообразные и некоторые другие пневматические системы с учётом геометрической, физической и конструктивной нелинейности систем и упругих свойств воздуха пневматических полостей. При этом системы рассчитаны на статические снеговые, температурные, кинематические, пневматические (подкачка и утечка воздуха), а также на динамические и другие нагрузки по программам, зарегистрированным в Реестре программ. При действии снеговых нагрузок III климатической зоны приращение давления в линзе достигает (0,25-0,50)  $q_0$ . Влияние геометрической нелинейности составляет (10-15) %. А влияние физической нелинейности упругой работы воздуха в линзе достигает (40-60) %. Нелинейные динамические колебания пневматических систем рассматривались также с учетом следящих нагрузок избыточного давления воздуха в полости. Их влияние колоссальное. Как в футбольном мяче.

Далее соискатель пишет: «Под руководством А.Ю. Кима ведутся разработки численных методик расчета... с помощью метода продолжения решения по параметру, детально описанному в работе [23].

*«23. Григолюк Э.И., Шалашилин В.И. Проблемы нелинейного деформирования: Метод продолжения решения по параметру в нелинейных задачах механики твердого деформируемого тела. – М.: Наука, 1988. – 232 с.».*

Но проф. Григолюк Э.И. не имел отношения к разработке метода продолжения по параметру. Крупные ученые часто описывают и разъясняют в своей книге какой-нибудь ставший уже популярным научный метод. И, как говорится, спасибо им за это. Соискатель часто характеризует работы других ученых. И если он характеризует их так же как работу [44], то у некоторых ученых может возникнуть недоумение. Подобную небрежность в диссертациях допускать нельзя.

Соискатель, пишет, что А.Ю. Ким решает задачи известным методом продолжения решения по параметру. Можно так сказать? В определенном смысле можно. Но ведь еще в разработанном им методе приращений он использует метод конечных элементов, еще он использует численную процедуру Эйлера-Коши, еще он использует универсальное уравнение газа. Именно численная процедура Эйлера-Коши в решении функциональных уравнений впервые позволила рассчитывать на каждой итерации не только задачу статики, но и задачу динамики, и задачу устойчивости, и задачу последствия избыточного давления воздуха и многое другое. Это новый метод и поэтому задачи, решенные этим методом тоже новые. Современный новый метод всегда является алгоритмическим, в определенной степени универсальным и включает в себя другие известные методы и достижения в области информатики.

И уж если сослаться на первоисточники, то необходимо знать следующее. В 1953-1958 гг. «метод приращений параметров» (под названием «метод вариации параметра») был разработан Д.Ф. Давиденко для решения нелинейных операторных уравнений задач прикладной математики. И об этом знают все известные математики. В 1965-1980 гг. академик проф. В.В. Петров развивает шаговый метод приращений параметров (под названием «метод последовательных нагружений») для решения нелинейных уравнений теории пластинок и оболочек. За варьируемый параметр принят параметр нагрузки. Усовершенствованию этого метода посвящены работы учеников В.В. Петрова. В 1967-1975 годах Э.Н. Кузнецовым при исследовании вантовых систем за варьируемые параметры приняты жесткостные параметры систем, и соответствующая модификация метода вариации параметра получает название «метод

последовательных приращений жесткостей”. В.И. Феодосьев, Л.Ф. Парфёнова, а затем и другие исследователи за варьируемый параметр уравнений принимают время, и эта разновидность метода вариации параметра получает название “метод последовательных приращений времени”. Начиная с семидесятых годов XX века, шаговый метод широко применяется и совершенствуется учёными многих стран, со временем получив название “итерационный метод приращений параметров”, эффективный в задачах не только анализа, но и синтеза нелинейных систем. Этот метод, широко применяется, позволяя варьировать одновременно множество разнообразных параметров и при этом достигать высокой точности расчета.

Однако следует отметить, что соискатель и не скрывал, что проблемами статики воздухоопорных систем он занимался по минимуму. Но все же он отметил, что решал задачу статики воздухоопорной системы методом Ньютона-Рафсона, чтобы подготовить систему для возбуждения в ней собственных колебаний и при этом вычислил три частоты и три соответствующие главные формы собственных колебаний воздухоопорной оболочки. Естественно соискателем не учитывалось при этом влияние избыточного давления воздуха на шаге, которое было бы существенным при тех больших амплитудах, при которых разрушается оболочка от действия тайфуна. А это вторая, то есть динамическая и опасная стадия работы сооружения, при которой избыточное давление воздуха учитывать необходимо. За короткий период шлюзы не срабатывают, и полость за это время остается замкнутой. Нельзя, к примеру, изучать полет футбольного мяча, не учитывая того, что он накачан воздухом.

Автором рассматривалась лишь первая, то есть статическая стадия, когда колебания можно не учитывать. Однако рассмотрим эти собственные колебания системы, имея в виду их чисто теоретическое значение.

Метод Ньютона-Рафсона, хоть и шаговый, но он не завязывается с шаговым динамическим расчетом. При известном начальном состоянии системы алгоритм метода Ньютона-Рафсона определяет лишь конечную стадию эксплуатации. Промежуточные шаги не имеют значения. На промежуточных шагах лишь уменьшается невязка, и достигается статическое равновесие системы, соответствующее заданной нагрузке. Но завязки статической задачи с задачей динамики через избыточное давление воздуха не происходит. Да это и понятно. В методе Ньютона-Рафсона, как и в других методах статического расчета отсутствует специальный блок, учитывающий работу универсального уравнения Менделеева для идеального газа при нулевых скоростях:

$$P_1 V_1 / T_1 = P V / T,$$

в котором параметры  $P_1$ ,  $V_1$ ,  $T_1$  характеризуют систему на конечной стадии монтажа.

Далее остановимся на спектре собственных колебаний. Чтобы разложить на шаге динамическое решение по главным формам собственных колебаний для таких систем, как тканевые оболочки, нужно учесть в разложении от 20 до 50-100 главных форм. Но как определить сотню главных форм собственных колебаний системы, если неизвестных десятки тысяч, а математика не совершенна и в России у вузовских ПК пока небольшие возможности.

Но для этого не обязательно обращаться к ученым Запада. Достаточно знать работы ученых МИИТ. Например, прежний заведующий кафедрой строительной механики крупный ученый проф. Александров А.А. в частности показал, как матрицу преобразования очень высокого порядка можно свести к эквивалентной в энергетическом отношении матрице сотого порядка. Применив далее обычный метод Якоби, можно вычислить сотню собственных значений исходной матрицы преобразования и сотню соответствующих собственных векторов. При этом не важно, сколько узлов приходится на главную форму собственных колебаний: тридцать тысяч или еще более. Другой корифей проф. МИИТ Шаповалов вывел пространственные матрицы реакций плоских мембранных конечных элементов, и соискатель мог бы воспользоваться ими. В этом случае ему не пришлось бы прибегать к сомнительному приему и обнулять реакции жесткого конечного элемента в программе ANSYS, искусственно сводя жесткость неподходящего четырехугольного конечного элемента к жесткости мембранного конечного элемента.

Соискатель вычислил всего три собственные функции определителя известным методом. Относятся они к конечной стадии эксплуатации системы и являются результатом решения линейной задачи. Понятно, что ни о каком влиянии избыточного давления воздуха на частоты собственных колебаний мембранной оболочки на текущем шаге речь не идет. Однако такое влияние есть, и оно существенное. Вспомним, что влияние физической нелинейности упругой работы воздуха на перемещения составляет 40-60 %.

Но если в первой части диссертации соискатель применял упрощенные расчетные схемы и принятые в России программные комплексы, то во второй части диссертации, а это, в основном, четвертая глава, актуальные задачи соискатель решил удачно благодаря применению известного и разработанного зарубежными учеными метода ANSYS. Это тот же итерационный метод приращений параметров с поэтапным

применением метода конечных элементов, но каждый этап нагружения при расчете дополнен алгоритмом уравнения идеального газа Менделеева-Клапейрона.

Для описания движения сплошной среды в этом методе используется подход Эйлера, при котором параметры состояния сплошной среды записываются для точек с координатами в неподвижной декартовой системе координат. Система уравнений для описания модели течения включает в себя: 1) уравнение состояния газа – используется известное уравнение состояния идеального газа Менделеева-Клапейрона, которое подходит для описания поведения воздуха при давлении, близком к атмосферному, и при невысоких скоростях потоков; 2) законы сохранения массы, импульса (количества движения) и энергии; 3) начальные и граничные условия.

Уравнение состояния идеального газа в задачах динамики комплекса ANSYS записывается в виде

$$\rho = \frac{P_{op} + P}{\frac{R}{M_w} T},$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $p$  – давление;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $p_{op}$  – атмосферное давление, обычно принимаемое равным 101 300 Па;  $M_w$  – молекулярная масса для воздуха, 29 г/моль;  $T$  – температура, определяемая из уравнения закона сохранения энергии, которое позволяет учесть взаимосвязь скорости и температуры воздуха через баланс внутренней и кинетической энергии.

Используемая соискателем литература:

1. ANSYS Mechanical APDL Element Reference. Release 15.0. - Canonsburg, 2013 - 1448 p.
2. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 15.0. - Canonsburg, 2013 - 814 p.
3. Федорова Н.Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

Во второй части диссертации соискателем решены следующие динамические задачи:

1. Численное моделирование колебаний в потоке воздуха, обтекающего пневматическую балку со сферическими торцами.
2. Численное моделирование обтекания недеформируемого кругового цилиндра потоком вязкой несжимаемой жидкости.
3. Свободные колебания гибкой пластины, находящейся в вязкой несжимаемой жидкости.
4. Изгиб пластины, обтекаемой вязкой несжимаемой жидкостью.



5. Численное моделирование обтекания потоком воздуха сферической воздухоопорной оболочки.

6. Решение задачи обтекания *потоком воздуха* воздухоопорной оболочки на прямоугольном плане.

Применение соискателем современного программного комплекса ANSYS и решение только тех задач, для которых в научной литературе имеются современные тестовые примеры, вызывает доверие к полученным в диссертации результатам. В отличие от материала первой, второй и в значительной степени третьей главы, результаты четвертой главы выглядят серьезными. Здесь больше конкретных результатов, больше удачных фотографий и таблиц, помогающих автору сопоставлять теоретические результаты с результатами экспериментов.

Новый материал второй части диссертации имеет высокое научное значение. Это хороший материал для кандидатской диссертации. Но этот материал, разумеется, не для докторской диссертации. Например, когда соискатель рассматривает колебания пневматического цилиндра, почему-то ему в голову не пришло учесть наряду с числом Рейнольдса еще число Струхала  $Sh$  и смоделировать периодическое отрывное течение в окрестности цилиндра с образованием вихревой дорожки Кармана. В этом случае соискатель мог бы рассчитать резонансный автоколебательный режим подкачки энергии в систему и получить картину резкого увеличения во время резонанса амплитуд колебаний. Кроме того, соискатель зачем-то изучает колебания прямоугольного консольного стержня, но при этом не догадывается искусственно создать кратную связь изгибных и крутильных колебаний стержня и смоделировать возникающий при этих условиях флаттер, интерес к которому у научных работников не ослабевает.

На наш взгляд, диссертация Мокина Николая Андреевича «Численный анализ деформирования воздухоопорных оболочек при статических и динамических воздействиях» является законченной квалификационной научно-исследовательской работой, в которой поставлена и в должной степени решена актуальная инженерная проблема.

На основе проведенных в диссертации исследований автором получены новые результаты, имеющие теоретическое и практическое значение.

Отмеченные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. Считаем, что рецензируемое исследование соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям п.9 «Положения о порядке

присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор – Мокин Николай Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – Строительная механика.

**Профессор кафедры «Теория сооружений и  
строительных конструкций»**

**ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.»**,

**доктор технических наук по специальности**

**05.23.17 –Строительная механика**

**Тел.: +7(452) 99-87-94**

**e-mail:sberbanksp@yandex.ru**

 **А.Ю. Ким**

**Адрес: Приволжский федеральный округ, Саратовская область, 410054, г.**

**Саратов, ул. Политехническая, д.77, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.»**

**10 марта 2019 г**

**Подпись Кима Алексе Юрьевича заверяю:**

**Ученый секретарь Ученого Совета**

**ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.»**

**к.ф.-м.н., доцент**

**10 марта 2019 г.**



 **О.А. Салтыкова**

## ОТЗЫВ

### официального оппонента на диссертацию

Мокина Николая Андреевича

(фамилия, имя, отчество – при наличии (полностью))

на тему «Численный анализ деформирования воздухоопорных оболочек при статических и динамических воздействиях»

(название диссертации)

по специальности 05.23.17 – Строительная механика

(шифр и наименование специальности)

на соискание ученой степени кандидата технических наук

(отрасль науки)

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Нестационарные задачи динамики мембранных оболочек в потоках обтекающих газов являются весьма сложными с вычислительной точки зрения в силу существенной нелинейности системы «мембрана – газ». Мембранная оболочка имеет пренебрежимо малую изгибную жесткость, т. е. стремящиеся к нулю критические силы, следовательно, не имеет единственной формы равновесного состояния при отсутствии давления наддува, создающего неотрицательные главные тангенциальные усилия, и в предельном случае не сопротивляется сжатию и сдвигу, т. е. представляет собой континуальную двумерную механическую систему с односторонней (неудерживающей) связью. При действии внешнего давления, сравнимого с внутренним давлением наддува, в мембранах возникают одноосные или нуль-осные состояния, приводящие к развитию смежных равновесных состояний, в динамике – подвижных систем складок, и неустойчивости типа «флаттер». Взаимодействие мембранных оболочек с потоками осложняется существенно переменной конфигурацией системы при следящем поле главного вектора внешних сил. Кроме того, обтекание оболочек, как правило, является турбулентным с образованием вихревых дорожек; нестационарные системы складок в нуль-осных или одноосных состояниях приводят к дополнительным возмущениям обтекающего потока. Прямое численное интегрирование уравнений движения для систем такого класса является весьма ресурсоемким, зачастую решения становятся численно неустойчивыми. Развитие теории мембранных оболочек на текущий момент явно не завершено, аналитические методы оценки границ динамической неустойчивости не разработаны. В то же время применение мембранных оболочек в различных отраслях, в частности, для создания крупноразмерных быстровозводимых

и развертываемых сооружений, интенсивно расширяется. Следовательно, развитие методов численного решения задач динамики мембранных оболочек, в том числе на базе стандартизованных комплексов прикладных программ, с обоснованием применимости тех или иных моделей и методов решения нестационарных задач, является актуальным как с практической, так и с методической точки зрения.

### **Степень обоснованности научных положений выводов и рекомендаций**

Степень обоснованности основных положений, выносимых на защиту, а также выводов и рекомендаций представляется достаточной для диссертационной работы, так как автором используются корректные постановки задач, выбор методов решения которых основывается на критическом анализе достигнутых ранее результатов и методов, с помощью которых известные результаты были получены.

Результаты диссертационного исследования апробированы, в частности, на 8-й Международной конференции по текстильным композитным материалам и надувным конструкциям (8<sup>th</sup> International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures) «Structural Membranes», Мюнхен, Германия, 2017 г., кроме того, по результатам диссертации представлены к публикации, допущены рецензентами и опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, три печатные работы.

### **Достоверность и новизна, полученных результатов**

Достоверность полученных результатов основывается на:

- Корректных постановках задач механики жидкости и мембранных оболочек.
- Обдуманном и обоснованном применении методов на базе конечно-элементной и конечно-объемной дискретизации начально-краевых задач, а также методов решения нестационарных задач аэроупругости.
- Аккуратным решением модельных задач, критическим анализом точности полученных решений.

Диссертационная работа содержит следующие основные новые результаты:

- Разработана методика решения задач строительной механики мембранных оболочек при динамических внешних воздействиях со стороны обтекающих потоков на основе методов конечных элементов и конечных объемов.
- Получены оценки зависимости спектра задачи о колебаниях воздухоопорных оболочек на прямоугольном плане от давления наддува.

- Предложено уточнение нормативного распределения нагрузок на воздухоопорные оболочки строительного назначения со стороны обтекающих воздушных потоков, целесообразное к применению в инженерной практике;
- Предложен, апробирован и рекомендован к использованию алгоритм решения задач динамики мембранных оболочек строительного назначения, взаимодействующих с воздушными потоками, в том числе с опорой на полученные автором результаты обосновано решение задач указанного класса в однократно связной постановке.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов**

**Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования** заключается в обосновании возможности решения ряда задач начально-краевых задач динамики мембранных оболочек в воздушных потоках на основе однократно связной постановке задачи при достаточной точности, а также в оценках давления наддува мембранных оболочек на величины собственных частот и формы колебаний.

**Практическая значимость результатов диссертационного исследования** заключается в создании метода решения задач нестационарной динамики ортотропных мембранных оболочек строительного назначения на базе комбинации методов конечных объемов и конечных элементов, а также в разработке нормативных распределений ветровых нагрузок для воздухоопорных оболочек, целесообразных к применению в инженерной практике.

### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы. Общий объем диссертации составляет 170 страниц, в текст включены 62 иллюстрации и 12 таблиц. Список цитируемых источников содержит 152 позиции.

Диссертация представляется завершенной научно-квалификационной работой, содержащей основные структурные элементы, требуемые для обоснования новизны и значимости результатов исследования.

**Во введении** приводится обоснование актуальности выбранной темы исследования, формулируются основные цели работы, задачи исследования, решение которых обеспечивает достижение сформулированной цели, оцениваются

научная новизна результатов работы и их практическая ценность, приводятся требуемые сведения о содержании работы.

**В первой главе** содержится обзор вариантов строительных конструкций на базе воздухоопорных мембранных оболочек, систематизированы нормативные документы по проектированию воздухоопорных мембранных конструкций, изложены подходы к инженерному расчету. Анализируются нагрузки, действующие на воздухоопорные сооружения, в том числе особенности расчета ветровых нагрузок, и возможные механизмы разрушения оболочек строительного назначения. Перечислены модели мембранных оболочек и методы решения краевых задач, включая численные методы на основе конечно-элементной дискретизации.

**Во второй главе** диссертационной работы изложены основы метода конечных элементов, обосновывается выбор модели материала воздухоопорной оболочки на основе технической ткани, приведены определяющие уравнения. Изложены особенности неявного интегрирования уравнений движения оболочки как дискретной системы высокой размерности на основе алгоритма Хилбера – Хьюза – Тейлора, приводятся параметры схемы, обеспечивающие устойчивость вычислительного процесса. Описана постановка задачи гидродинамики вязкой среды, изложены основы метода конечных объемов, обоснован выбор метода усреднения по Рейнольдсу для турбулентных течений. Изложен алгоритм решения связанной задачи гидроупругости методом конечных элементов с сочетанием стандартных алгоритмов, применяемых в конечно-элементных комплексах.

**В третьей главе** описаны результаты апробирования методики на основе системы модельных задач: статического деформирования мембранных оболочек неотрицательной Гауссовой кривизны, свободных колебаний оболочки, находящейся под действием давления наддува с использованием спектральных разложений по собственным функциям линеаризованной системы, обтекания жесткого цилиндра с образованием вихревой дорожки с вычислением усредненных аэродинамических коэффициентов, свободных колебаний пластины в вязкой несжимаемой жидкости и обтекания упругой нелинейно деформируемой пластины стационарным потоком вязкой несжимаемой жидкости. Автором анализируются наблюдаемые эффекты и делаются выводы о требуемой структуре связанной модели динамики мембраны в потоке, а также предварительно оцениваются параметры алгоритмов численного решения частных задач.

**В четвертой главе** диссертации изложены результаты решения задач механики мембранных оболочек. Построена модель продувки сферической оболочки, допускающая сравнение численного решения с имеющимися экспериментальными данными. Анализируются различные варианты неструктурированных и структурированных сеток, а также разные варианты полуэмпирических моделей турбулентности (как однопараметрических, так и двухпараметрических). Отмечена техническая особенность построения конечно-элементных моделей тонких оболочек в потоке – необходимость введения различных внешней и внутренней поверхностей для обеспечения возможности приложения как давления наддува, являющегося следящей нагрузкой, так и определения взаимодействия оболочки с обтекающим потоком. Предложено решение задачи с использованием контактных элементов, обеспечивающих взаимосвязь двух двумерных объектов, соответствующих внутренней и внешней поверхностям оболочки. Вычислены аэродинамические силы (как для изолированной оболочки, так и для оболочки с экраном), и аэродинамические коэффициенты; проведено сравнение результатов, полученных в связной и несвязной постановках задачи. Показан эффект ортотропии технической ткани на характер обтекания деформируемой оболочки, в частности, на образование локального максимума аэродинамического коэффициента, не существующего в случае изотропной оболочки. Обоснован выбор двухпараметрической модели турбулентности по Ментеру.

Получено решение задачи расчета мембранной ортотропной оболочки на прямоугольном плане. Вычислена начальная форма оболочки и обоснован выбор локально-оптимальной формы, препятствующей местной потере устойчивости вследствие образования одноосных областей при сохранении эффективного объема. Показано, что выбранная форма при действии расчетного наддува является практически равнопрочной. Решена задача о свободных колебаниях, вычислен спектр и определена зависимость частот колебаний от давления наддува. Подтверждены аналитические оценки о близости данной зависимости к линейной. На основе предложенной выше методики построено численное решение задачи об обтекании оболочки потоком воздуха, построены линии тока и вычислены аэродинамические коэффициенты. Проведено сравнение величин аэродинамических коэффициентов, полученных на основе постановок задач различной связности. Вычислены амплитуды перемещений оболочки в потоке и показано, что наибольшие

горизонтальные перемещения развиваются при ненулевом угле скольжения. Предложены меры по предотвращению локальной потери устойчивости оболочкой.

Разработаны упрощенные методики расчета мембранной оболочки в потоке, основанные на однократно связной постановке задачи и приложении внешнего давления, соответствующего решению задачи гидроупругости. Предложены уточненные нормы расчета перемещений воздухоопорных оболочек, основанные на полученных автором результатах.

**В заключении** приводятся основные выводы, следующие из полученных результатов.

### **Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации**

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Постановки задач, решаемых автором в работе, сводятся к описанию процедуры конечно-элементного моделирования и ссылкам на цитируемые источники. Следует отметить, что подобное изложение материала существенно затрудняет восприятие результатов работы и может приводить к разночтениям. Словесное описание задачи, в том числе и весьма подробное, в работах по техническим наукам не может заменять математически строгой формулировки начально-краевых задач.
2. Несмотря на подробный обзор, содержащийся в первой главе, автором опущен класс подходов к решению нелинейных задач динамики, основанный на снижении размерности (методы нелинейных нормальных форм, Кархунена – Лева, асимптотический подход и др.), ориентированных именно на приложение к теории гибких оболочек. Известно, что задачи о динамической неустойчивости мембран могут быть чрезвычайно сложны с вычислительной точки зрения при попытке прямого интегрирования уравнений движения, поэтому отказ от рассмотрения редукционного подхода, как минимум, требует обоснования.
3. Некоторые формулировки, применяемые автором, нечетки. Так, неясно, что имеется в виду под «корректной» моделью: корректность постановки задачи по Адамару или некоторое другое понятие?

Указанные замечания, однако, не являются препятствием для положительной оценки диссертационной работы.



### **Соответствие автореферата основному содержанию диссертации**

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы, раскрывает цель и задачи исследования, обосновывает новизну полученных автором результатов, содержит описание положений, выносимых на защиту.

**Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. М.: Стандартинформ. – 2012**

Диссертация полностью удовлетворяет критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» по пунктам 9, 10, 11 и 14, а именно:

- Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для строительной механики, а именно – методика численного решения задач нестационарной динамики мембранных воздухоопорных оболочек в воздушных потоках, основанная на сочетании методов конечных объемов и конечных элементов, обоснование целесообразного уточнения нормативного распределения ветровой нагрузки на воздухоопорную оболочку строительного назначения, а также рекомендации к использованию однократно связанных постановок задач о динамике мембранных оболочек в воздушных потоках, что соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней;
- В диссертации приведены новые, полученные автором лично научные результаты в соответствии с требованием п. 10 Положения о присуждении ученых степеней;
- Основные результаты диссертационной работы опубликованы в трех статьях в открытых периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных работ в соответствии с п. 11 Положения о присуждении ученых степеней;
- В диссертации присутствуют ссылки на авторов и источники заимствования материалов в соответствии с требованием п. 14 Положения о присуждении ученых степеней.

## Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук:

Диссертация Мокина Николая Андреевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченным научно-квалификационным трудом, содержит новые результаты, имеющие практическую значимость, выполнена на высоком уровне и, следовательно, соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Мокин Николай Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – Строительная механика.

Официальный оппонент

Жаворонок Сергей Игоревич,

Кандидат физико-математических наук,

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела,

125040, Москва, Ленинградский проспект 7,

(499) 946-17-77, [Zhavoronok@iam.ras.ru](mailto:Zhavoronok@iam.ras.ru)

ФГБУН Институт прикладной механики РАН

Старший научный сотрудник



(подпись)

Жаворонок С. И.

(инициалы, фамилия)

Подпись Жаворонка С. И. заверяю

Ученый секретарь ИПРИМ РАН

к. ф.-м. н.



(подпись)

Карнет Ю. Н.

(инициалы, фамилия)

