

На правах рукописи



АФАНАСЬЕВА ИРИНА НИКОЛАЕВНА

**АДАПТИВНАЯ МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТРЕХМЕРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ
СТРОИТЕЛЬНОЙ АЭРОГИДРОУПРУГОСТИ**

Специальность: 05.13.18 –

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2014 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
член-корреспондент РААСН
Белостоцкий Александр Михайлович

Официальные оппоненты: **Гришанина Татьяна Витальевна,**
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБОУ ВПО «Московский
авиационный институт», проф. каф. 603
«Прочность авиационных и ракетно-
космических конструкций»

Климшин Дмитрий Валерьевич,
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет», началь-
ника конструкторского отдела архитек-
турно-строительного проектирования де-
партамента капитального строительства

Ведущая организация: Федеральное бюджетное учреждение
«Научно-технический центр по ядерной и
радиационной безопасности»

Защита состоится «26» декабря 2014 г. в 11-00 час. на заседании диссертационного совета Д212.138.12, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, зал ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Анохин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задачи взаимодействия конструкций и сооружений с жидкостью/газом (Fluid-Structure Interaction (FSI)) представляют большой и неослабевающий интерес в науке, промышленности, биомедицине и других приложениях. Предпосылкой для подробного изучения природы аэрогидроупругости и поиска методов решения связанных задач применительно к строительной области послужил ряд трагических случаев обрушения (США, Такомакский мост, 1940 г; Англия, градирни ТЭС Феррибридж, 1965 г. и др.) и опасных колебаний (например, Волгоградский мост, 2010 г.) конструкций в результате возникновения аэродинамической неустойчивости, а также разрушения тонкостенных металлических резервуаров с жидкостью после интенсивного сейсмического воздействия (например, Япония, г.Кобе, 1995 г., г.Томакомай, 2003 г.).

Основная сложность моделирования при этом заключается в необходимости получения совместного согласованного решения уравнений динамики конструкции и уравнений движения жидкости/газа. За последние десятилетия разработано большое количество аналитических и полуэмпирических методов. Однако, данные методы преимущественно применимы для узкого класса задач с простейшей геометрией и рядом ограничений, накладываемых на постановку задачи и граничные условия. Для решения же практических (промышленных) задач требуется учитывать произвольную геометрию и граничные условия. Поэтому, одним из основных и, по сути, безальтернативным сегодня подходом для решения этих сложных задач является численное моделирование.

При этом связанные трехмерные динамические задачи аэрогидроупругости, характерные и научно значимые для весьма разнородных технических приложений (колебания мостов и гибких строительных конструкций в ветровом потоке, совместные гидроупругие колебания резервуаров с жидкостью при сейсмических воздействиях и др.), по сей день весьма далеки от своего исчерпывающего решения и требуют научно-методических и программно-алгоритмических разработок и исследований.

Целью диссертационной работы, в связи с вышеизложенным, является разработка эффективной адаптивной методики численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор существующих отечественных и зарубежных нормативных, экспериментальных и теоретических подходов решения заявленной проблемы.

2. Классификация значимых задач строительной аэрогидроупругости с позиции как физики явлений, так и математических/численных подходов их моделирования.

3. Обоснованный выбор наиболее эффективных и альтернативных современных математических моделей, численных методов и программных реализаций как основы разрабатываемой адаптивной методики.

4. Верификация и «настройка» параметров разработанной методики на представительном наборе тестовых задач, имеющих аналитическое, экспериментальное и (или) альтернативное численное подтверждение.

5. Выбор, на основе выполненной верификации, практически реализуемых постановок трехмерных связанных задач аэрогидроупругости.

6. Апробация и подтверждение работоспособности адаптивной методики на реальном объекте с сильным проявлением трехмерных динамических эффектов аэрогидроупругости.

Научная новизна работы:

1. Разработана и верифицирована адаптивная методика численного моделирования, гибко настраиваемая на объект и задачи исследования аэрогидроупругих колебаний в двумерной и трехмерной постановках, с использованием альтернативных современных подходов математического моделирования поведения жидкости/газа и конструкций, численно реализованных на основе междисциплинарных («тяжелых») программных комплексов.

2. На выполненной многопараметрической верификационной задаче (известный в «общемировой» исследовательской практике тест BARC с объем-

ным обтеканием прямоугольной призмы) показано, что реализация альтернативных моделей турбулентности даже при самой подробной дискретизации приводит к значимому разбросу в определении пульсационной составляющей аэродинамического давления и пространственно-временных характеристик потока. Этот вывод, согласующийся с результатами численного и экспериментального моделирования ведущих зарубежных авторов, определил и выбор моделей и методов дальнейших исследования связанных задач аэрогидроупругости.

3. На связанной динамической верификационной задаче аэрогидроупругости (известный в мировой практике тест – большие колебания гибкой упругой балки в спутном следе за жестким цилиндром) оптимизированы параметры дискретных моделей и методов расчета, обеспечившие близость полученных результатов к «эталонным» данным в значимом диапазоне характеристик потока.

4. На серии верификационных задач гидроупругости, имеющих теоретическое и экспериментальное эталонные решения, показано соответствие и обоснованы диапазоны применимости альтернативных численных подходов моделирования жидкости со свободной поверхностью при кинематических динамических воздействиях.

5. Для практически важной и конструктивно сложной реальной системы «тонкостенный резервуар с понтоном – нефтепродукты» емкостью 50 000 м³ по разработанной адаптивной методике впервые смоделированы и проанализированы в связанной гидроупругой постановке динамическое напряженно-деформированное состояние конструкции резервуара и волнообразование на поверхности жидкости при 8-балльном сейсмическом воздействии, заданном акселерограммой землетрясения.

Практическая значимость работы. Разработанная, верифицированная и апробированная адаптивная методика численного моделирования обеспечивает новый, востребованный современной практикой уровень расчетного анализа связанных динамических аэрогидроупругих инженерных систем в важных

строительных приложениях (мостовые и гибкие общестроительные конструкции, градирни АЭС и ТЭС, тонкостенные резервуары с жидкостью). Результаты выполненных расчетных исследований динамики гидроупругой системы «тонкостенный резервуар с понтоном – жидкость» большой емкости при сейсмическом воздействии могут быть использованы для оптимизации параметров несущих конструкций и организации адекватной системы их мониторинга. Решенные верификационные задачи могут быть положены в основу процедуры верификации программных комплексов в системе Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН).

Внедрение:

Представленные результаты диссертации использованы в научно-исследовательских работах ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», Научно-образовательном центре компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) МГСУ и ООО «ГК Техстрой». Разработанная методика и результаты верификационных исследований используются в практике обучения студентов кафедры «Информатика и прикладная математика» ФГБОУ ВПО «МГСУ» по дисциплине «Вычислительная гидрогазодинамика».

Личный вклад соискателя в решение исследуемой проблемы заключается в обоснованной конкретизации задач исследования, обобщении, систематизации и развитии теоретических составляющих исследуемых вопросов, а также разработке и апробации методики численного моделирования. Соискателем самостоятельно получены, интерпретированы и апробированы основные результаты исследования.

На защиту выносятся:

- классификация значимых задач строительной аэрогидроупругости с позиций физики явлений и математических/численных подходов их моделирования;
- разработанная адаптивная методика решения связанных динамических задач строительной аэрогидроупругости, программно реализующая альтерна-

тивные современные подходы математического моделирования и численные схемы, гибко настраиваемая на объект и задачу исследования;

– результаты численного решения серии представительных верификационных задач, показавшие возможности и ограничения предложенной методики и ее программно-алгоритмических составляющих, обоснованные рекомендации по выбору основных параметров методики;

– результаты расчета динамического расчета реальной гидроупругой системы «тонкостенный резервуар с понтоном - нефть» при сейсмическом воздействии, заданном акселерограммой, с анализом выявленных эффектов взаимодействия жидкости с оболочкой и понтоном.

Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается: корректностью постановки задач в рамках теоретических предпосылок строительной механики, механики деформируемого твёрдого тела и жидкости/газа; обоснованностью алгоритмов расчёта с применением апробированных численных методов механики сплошной среды, реализованных в верифицированных программных комплексах, в том числе при хорошо согласуемом решении тестовых задач; согласованностью полученных результатов с альтернативными численными и экспериментальными данными, а также применением апробированных программных комплексов для численной реализации решений.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на вузовских, всероссийских и международных научных конференциях: III Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (ЮРГТУ (НПИ), г. Новочеркасск, 2010 г.); IV Международной научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», (МГСУ, г. Москва, 29 июня 2011 г.); IX Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции «Фундаментальные науки в современном строительстве» (г. Москва, 30 марта 2012 г.); IV Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования

конструкций и сооружений» (г. Челябинск, 19-22 июня 2012 г.); 25-ой Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» BEM&FEM (г. Санкт-Петербург, 23-26 сентября 2013 г.); 1-ой Международной конференции «Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering» (TINCE-2013) (Франция, г.Париж 28-31 октября 2013 г.); III Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (г.Томск, 26-28 марта 2014 г.); XI Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции «Фундаментальные науки в современном строительстве» (г. Москва, 31 марта 2014 г.); III Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения») (МГСУ, г. Москва, 15 апреля 2014 г.); V Международном симпозиуме РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (г. Иркутск, 1-6 июля 2014 г.); 11-ом Всемирном конгрессе вычислительной механики «11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI)» (Испания, г. Барселона, 20-25 июля 2014 г.); XXIV Российско-Польско-Словацком семинаре «Теоретические основы строительства» (Польша, г. Вроцлав, 23-28 августа 2014 г.); регулярных научных семинарах кафедры ИПМ и НОЦ компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов ФГБОУ ВПО «МГСУ» и Научно-исследовательского центра «СтаДиО» (под руководством члена-корреспондента РААСН А.М. Белостоцкого).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 25 работах, из них 13 опубликованы в изданиях перечня ВАК, 2 – в реферируемых журналах Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы (146 наименования, в том числе – 92 на иностранных языках), 91 рисунков и 29 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится обоснование актуальности работы, определены проблемы, цели и задачи исследований, перечислены основные научные и практические результаты, кратко изложено содержание диссертации по главам.

В первой главе дается аналитический обзор существующих отечественных и зарубежных инженерных методик оценки аэродинамической неустойчивости строительных конструкций и динамического поведения системы «сооружение – жидкость». Развитие отечественной нормативной базы связано с именами таких ученых, как Барштейн М.Ф., Коренев Б.Г., Казакевич М.И., Попов Н.А., Травуш В.И., Гордеев В.Н., Перельмутер А.В., Бирбраер А.Н. и др.

Перечислены особенности реализации экспериментальных исследований по объявленной теме на основе изученных работ отечественных и зарубежных ученых и специалистов, таких как: Березин В.Л., Попов Н.А., Казакевич М.И., Березин М.А., Остроумов Б.В., Айрапетов А.Б., Гувернюк С.В., Гагарин В.Г., Кузнецов С.Г., Горлин С.М., Шутов В.Е., Goudarzi M. A., Davenport A.G., Pal P., Kareem A., Khezzar L., Blocken B., Geurts B.J., Schewe G. и др.

Представлен обзор исследований в области математического и численного моделирования задач аэрогидроупругости. Существующие подходы (*лагранжев, эйлеров, смешанный лагранж-эйлеров – ALE*) и методы (*метод конечных элементов, метод конечных объемов, метод сглаженных частиц* и др.) моделирования процессов взаимодействия твердых и упругих тел с жидкостью или газом изучены в работах отечественных и зарубежных ученых, среди которых, в частности, Белостоцкий А.М., Болдырев Ю.Я., Гарбарук А.В., Горшков А.Г., Гришанина Т.В., Дубинский С.И., Зиновьева Т.В., Климшин Д.В., Коробкин А.А., Лавров Ю.А., Мелешко В.А., Модорский В.Я., Морозов В.И., Стрелец М.Х., Филиппенко Г.В., Шишаева А.С., Шклярчук Ф.Н., Bathe K.J, Blocken B., Greenhow M., Kareem A., Lin W.M., Pal P., Shao S., Turek S., Hron J., Wagner R., Westergaard H.M., Zienkiewicz O.C. и др.

Среди программных комплексов для решения наукоемких задач в связанной постановке наиболее универсальные и применяемые на практике: ком-

мерческие многодисциплинарные («тяжелые») ПК – ANSYS, ABAQUS, Dytran, LS-DYNA, Star-CCM+ – и ПК с открытым исходным кодом – OpenFOAM и др.

Вторая глава посвящена описанию разработанной адаптивной методики численного моделирования трехмерного динамического взаимодействия сооружения с жидкостью. Приведена классификация значимых задач строительной аэрогидроупругости с позиции как физики явлений, так и математических/численных подходов их моделирования (рис. 1).

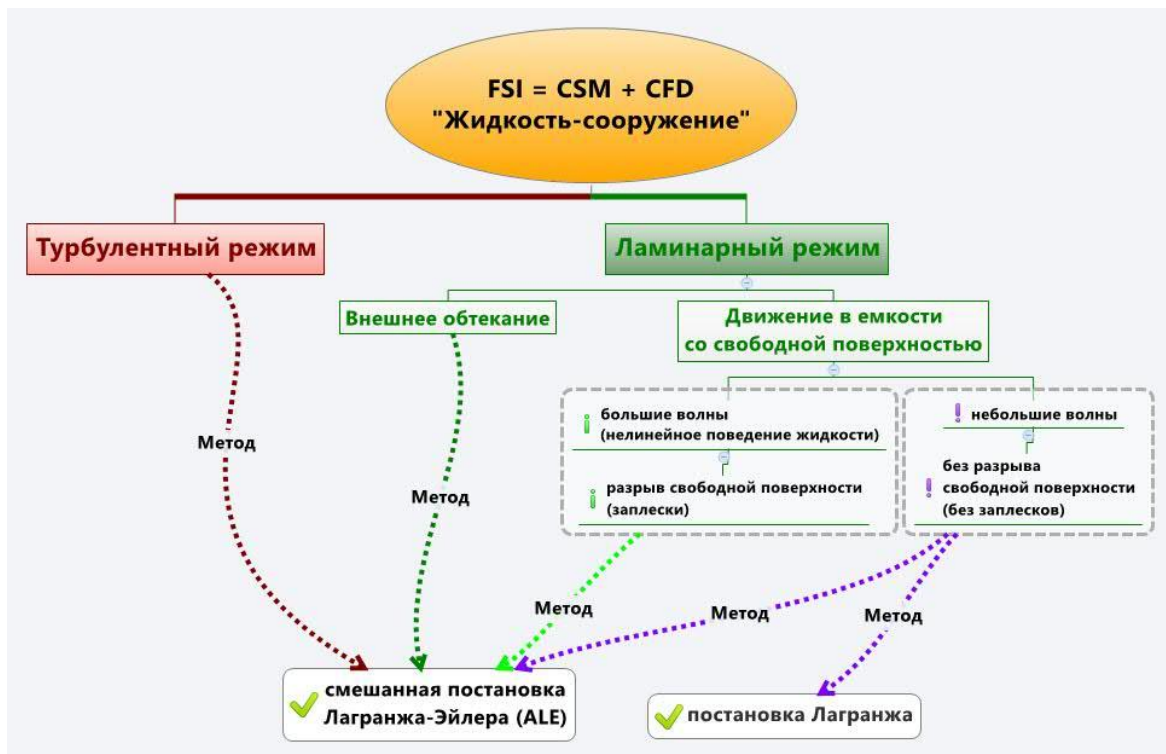


Рис.1. Общая структурная схема разработанной методики.
FSI – Fluid-Structure Interaction; CSM – Computational Structure Mechanics;
CFD – Computational Fluid Dynamics

Представлена математическая формулировка наиболее эффективных и альтернативных современных подходов математического моделирования, численных методов и программных реализаций как основы разработанной адаптивной методики.

Лагранжевы уравнения движения для *сооружения* имеют вид:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \tau + \bar{f}^B \quad (1)$$

где ρ – плотность; \bar{u} – вектор перемещений сооружения; t – время; τ – тензор напряжений Коши; \bar{f}^B – вектор объемных нагрузок; запись типа $\nabla \cdot$ здесь и далее обозначает действие оператора дивергенции (в деформированном состоянии).

Уравнения (1) могут быть линейными или нелинейными, в зависимости от применяемых определяющих соотношений для материала и характера перемещений сооружения (большие или малые).

Уравнения движения *несжимаемой ньютоновской жидкости* Навье-Стокса (т.е. вязкой жидкости, подчиняющейся при своем течении закону вязкого трения Ньютона) в соответствующей смешанной постановке *ALE* имеет вид:

$$\rho \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \rho[(\bar{U} - \bar{\hat{U}}) \cdot \nabla] \bar{U} = \nabla \cdot \tau + \bar{f}^B \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\bar{U} - \bar{\hat{U}}) \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \bar{U} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho(\bar{U} - \bar{\hat{U}}) \cdot \nabla e = \tau \cdot D - \nabla \cdot \bar{q} + q^B \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости; $\partial / \partial t$ – полная производная функции в пространственной (деформированной) движущейся системе координат; \bar{U} – скорость жидкости; $\bar{\hat{U}}$ – скорость движения системы координат; τ – тензор напряжений в жидкости; \bar{f}^B – вектор объемных нагрузок в жидкости; e – удельная внутренняя энергия; D – тензор скоростей деформации,

Уравнения (2), (3) и (4) представляет собой соответственно уравнения сохранения количества движения (импульсов), массы и энергии.

Задавая в указанных уравнениях $\bar{\hat{U}} = 0$ (т.е. определяя условия неподвижности системы координат или условия неподвижности соответствующей конечноэлементной сетки) можем получить эйлерову постановку. При задании в уравнениях (2)-(4) условия $\bar{\hat{U}} = \bar{U}$ (система координат движется с той же скоростью, что и частицы жидкости) можем получить лагранжеву постановку.

Для моделирования турбулентных течений приведены математические формулировки основных подходов таких как: моделирование крупных вихрей

(LES); осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS); моделирования отсоединенных вихрей (DES).

При взаимодействии потока вязкой жидкости с твердой средой на контактной поверхности должны выполняться уравнения равновесия и совместности:

$$\tau^S \cdot \bar{n} = \tau^F \cdot \bar{n}; \quad (6)$$

$$\bar{u}^I(t) = \hat{u}^I(t); \quad (7)$$

$$\bar{\dot{u}}^I(t) = \bar{U}^I(t) = \hat{U}^I(t); \quad (8)$$

$$\bar{\ddot{u}}^I(t) = \bar{\dot{U}}^I(t) = \hat{\dot{U}}^I(t), \quad (9)$$

где \bar{n} – единичный направляющий вектор нормали к поверхности контакта «сооружение – жидкость»; \bar{u} и \hat{u} – соответственно перемещения сооружения и массива жидкости (или узлов соответствующей конечноэлементной сетки в рамках метода конечных элементов); \bar{U} – скорость жидкости; \hat{U} – скорость массива жидкости; символ верхней точки здесь и далее обозначает операцию дифференцирования по времени; верхние индексы I, S, F обозначают соответственно контактную поверхность, твердое тело и жидкость.

Для уравнений поведения сооружения, жидкости/газа и их взаимодействия приведена численная аппроксимация с применением *метода конечных элементов* и *метода конечных объемов*. Дискретизация по времени представлена неявным методом Ньюмарка. Рассмотрены *прямой* и *итерационный* алгоритмы решения линейных алгебраических уравнений.

В качестве *базового* выбран лицензионный универсальный программный комплекс (ПК) ANSYS. В 2010 г. ПК ANSYS Mechanical верифицирован согласно требованиям Российской академии архитектуры и строительных наук (свидетельство РААСН №02/ANSYS/2010). Автор диссертации является членом авторского коллектива «верификаторов».

Для решения связанных задач аэрогидроупругости в ПК ANSYS реализовано два подхода:

1) *Прямой метод (Direct Method)* – основан на КЭ-анализе связанных полей с использованием специализированных конечных элементов в постановке *Лагранжа*. Например, для моделирования связанной системы «тонкостенный резервуар – жидкость» можно использовать четырехузловые пространственно-оболочечные КЭ SHELL181 и объемные восьмиузловые FLUID80 (модификация элемента SOLID45 с нулевой сдвиговой жесткостью), соответственно. При этом на общих поверхностях жидкости и конструкции (оболочки) накладываются условия совместности перемещений по степеням свободы по нормали к поверхностям с использованием команды *CP*. А для вычисления собственных частот и форм колебаний жидкости используется *редуцированный метод*.

2) Методы *передачи нагрузки (Load Transfer Methods)* – основаны на проведении двух или более типов расчетов, связанных с анализом различных расчетных полей, в связанной постановке посредством двусторонней передачи расчетных данных между различными решателями в виде, например, перемещений (с одной стороны) и нагрузки (с другой стороны). Процесс передачи и обмена данными осуществляется с помощью специализированной программной надстройки Workbench: System Coupling и решателя ANSYS Multi-field solver (MFX-Multiple code).

Во избежание возникновения ошибок, связанных с появлением вытянутых, искривленных элементов, необходимо задавать адекватные параметры перестроения сетки, в частности, «жесткости сетки» вблизи подвижных границ, особенно, если на последних присутствуют острые углы. Для обеспечения сходимости и устойчивости решения на каждом связанном шаге по времени необходимо задавать следующие параметры расчета: максимальное количество итераций на каждом связанном шаге; критерий сходимости для нагрузок и перемещений *TOLER*; фактор релаксации α для вычисления нагрузок и перемещений на каждой итерации связанного шага:

$$\varphi = \varphi_{pre} + \alpha(\varphi_{new} - \varphi_{pre}), \quad (10)$$

где φ_{new} – значение переменной, вычисленной на текущей итерации, φ_{pre} – значение переменной, вычисленной на предыдущей итерации, α – коэффициент

релаксации, φ – скорректированное значение искомой величины на текущей итерации. Чем меньше значение коэффициент релаксации, тем дольше требуется времени на расчет и больше итераций на связанном шаге. Поэтому рекомендуется начинать со значения по умолчанию. При неустойчивом решении и недостижении необходимого уровня сходимости рекомендуется коэффициент релаксации уменьшать.

Связанное решение считается сошедшимся при условии:

$$\varepsilon^* = \frac{\log(\varepsilon / TOLER)}{\log(10.0 / TOLER)} \leq 0, \quad \varepsilon = \frac{\|\varphi_{new}\| - \|\varphi_{pre}\|}{\|\varphi_{new}\|} \quad (11)$$

Для проведения многовариантных расчетных исследований на языках Python и встроенного в ПК ANSYS – APDL разработаны программы, позволяющие ускорить и параметризовать процесс создания расчетных сеток и КЭ-моделей и обработку полученных результатов.

В **третьей главе** приводятся результаты верификации и «настройки» параметров разработанной методики на представительном наборе тестовых задач, имеющих теоретическое и экспериментальные эталонные решения.

Моделирование трехмерного нестационарного турбулентного обтекания прямоугольной призмы. На верификационной задаче (известный в «общемировой» исследовательской практике – BARC) показано, что при весьма точном определении средних составляющих реализация даже наиболее продвинутых альтернативных моделей турбулентности при самой подробной дискретизации приводит к значимому разбросу в определении пульсационной составляющей аэродинамического давления и пространственно-временных характеристик потока. Этот вывод, согласующийся с результатами численного и экспериментального моделирования ведущих зарубежных авторов, определил и выбор моделей и методов дальнейших исследования связанных задач аэрогидроупругости. Наиболее близкие к эксперименту результаты LES- и DES-расчетов показаны на рис. 2.

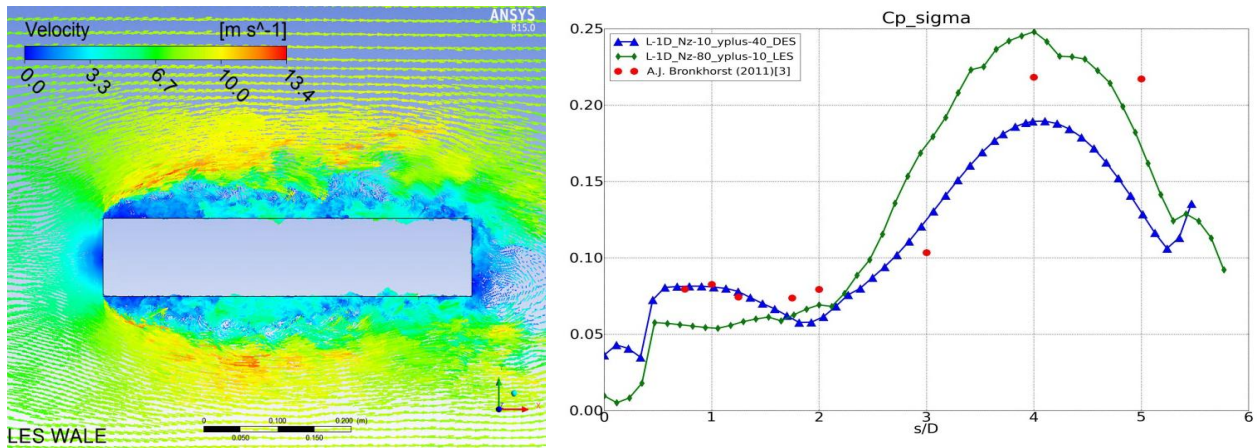


Рис. 2. Слева: структура потока вблизи обтекаемого тела (LES-WALE, мгновенное поле скоростей, м/с). Справа: пульсационная $C_{p\sigma}$ составляющая аэродинамического коэффициента давления вдоль верхней поверхности обтекаемого тела (DES-синяя линия, LES-зеленая линия, эксперимент – точки)

Моделирование двумерного нестационарного обтекания гибкой упругой конструкции в связанной постановке. В «фокусе» этой задачи аэрогидроупругости лежит верификация методики расчета на примере внешнего обтекания гибкой упругой балки, расположенной в спутном следе за неподвижными жестким цилиндром и погруженной в вязкую несжимаемую жидкость.

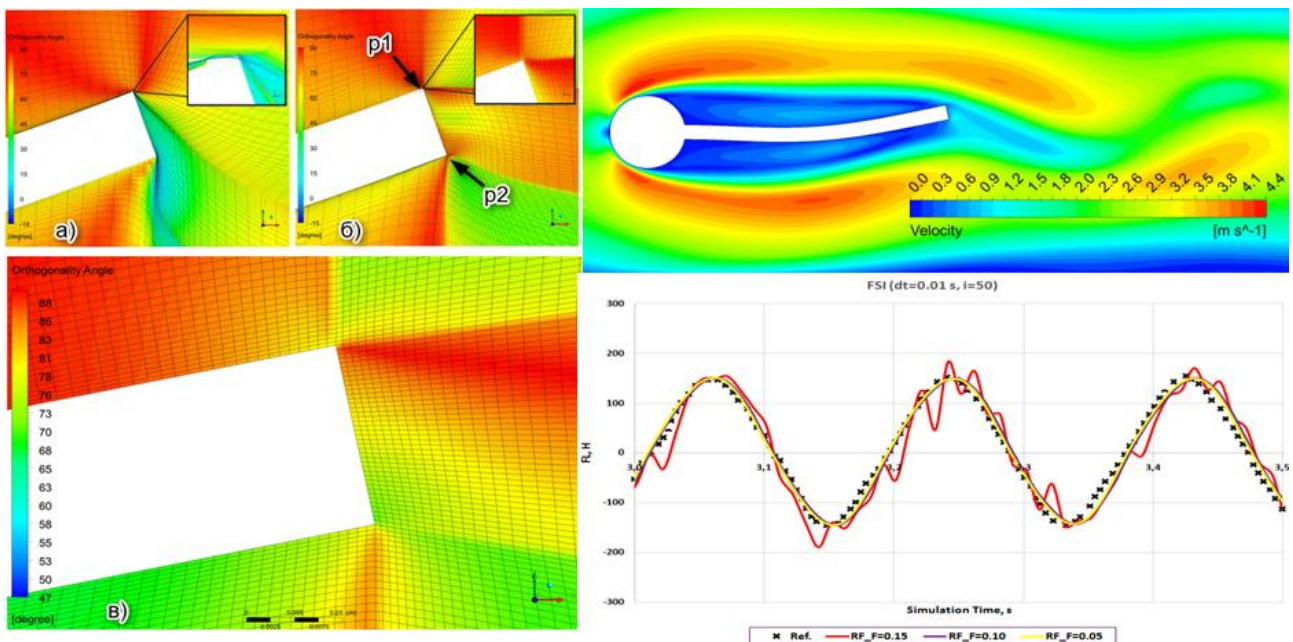


Рис. 3. Слева: топология расчетной сетки вблизи подвижной границы с заданием жесткости сетки различными способами. Справа: расчетное поле скоростей (сверху, м/с) и временная зависимость подъемной силы F_L (снизу, Н) – сопоставление результатов расчетов при варьировании коэффициента релаксации по нагрузкам с источником (Ref.), $\Delta t_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ с

Определены оптимальные параметры *деформируемой* сетки, позволяющие избежать возникновения ошибок, связанных с ее топологией. Выявлена зависимость устойчивости связанного решения от выбранного коэффициента релаксации (рис.3). Показана зависимость частотных характеристик потока при учете взаимного влияния гибкой конструкции и потока друг на друга.

Моделирование поведения жидкости в резервуаре с жесткими стенками при гармоническом динамическом воздействии. Качественное (форма волны) и количественное (высота и частота колебаний волны) соответствие численных результатов (для трех альтернативных применяемых подходов) с экспериментальными данными получено в результате верификационных исследований на *третьем* тестовом примере. Подходы *эйлеров* и *ALE* позволяют отследить нелинейное поведение жидкости (проявляющееся с увеличением амплитуды колебания волны), в отличие от *лагранжева* подхода. При динамическом воздействии меньшей амплитуды рассогласование между численными результатами, полученными по альтернативным подходам, стремится к нулю.

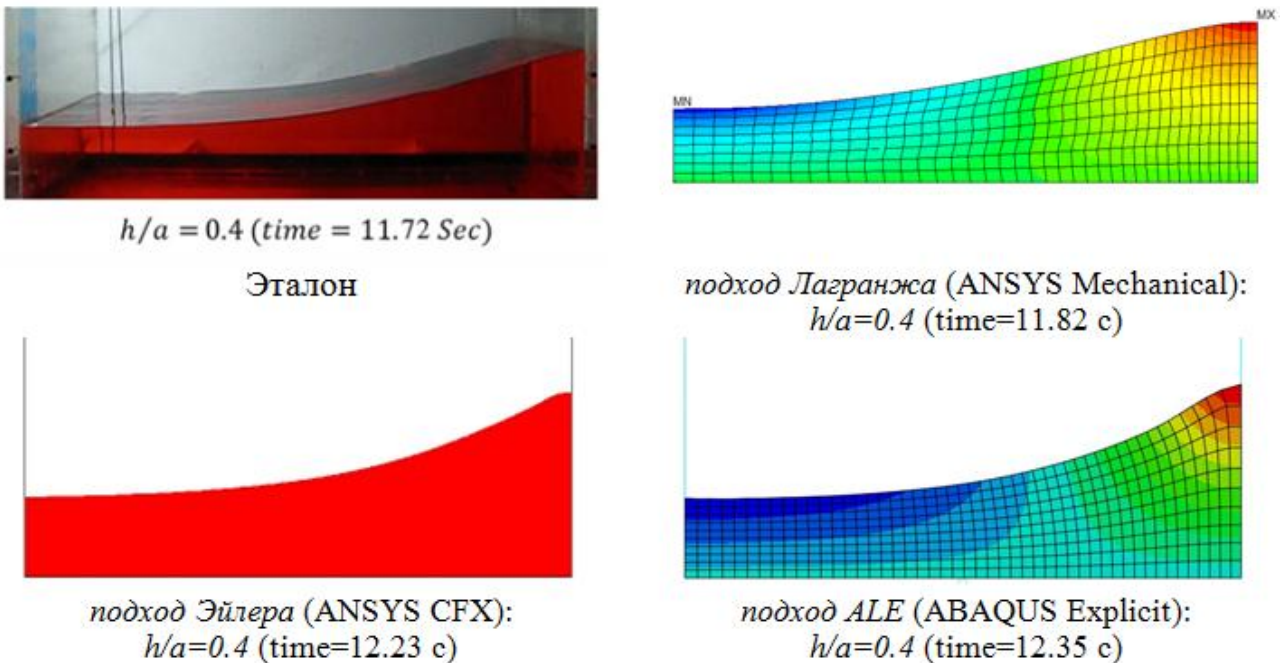


Рис. 4. Форма вынужденных колебаний жидкости. Сопоставление расчетных и «эталонных» результатов. Расчетный случай: $h/a = 0.4$, $\omega_l = 4.387$ рад/с (резонансный режим)

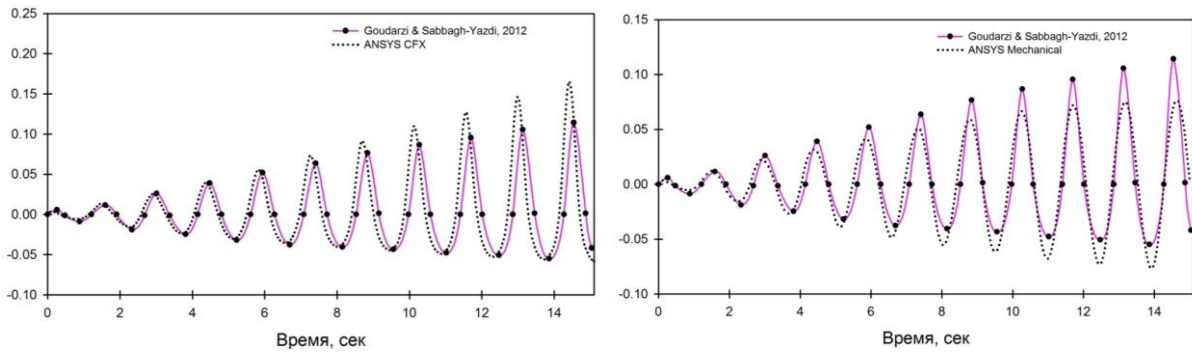


Рис. 5. Зависимость высоты волны на левой стенке резервуара от времени (резонансный режим). Слева – подход Эйлера (ANSYS CFX), справа – подход Лагранжа (ANSYS Mechanical). Расчетный случай: $h/a = 0.4$, $\omega_1 = 4.387$ рад/с. Пунктир – эксперимент

Численное моделирование динамики экспериментальной установки «подвижная рама – тонкостенный резервуар – жидкость» в связанной постановке. Динамика тонкостенного резервуара с водой при импульсно-силовом воздействии (испытания физической модели рамы с резервуаром РВС-5000 выполнены в НОЦ ИИМСК МГСУ) исследовалась при различных уровнях заполнения (взлива) по разработанной методике в постановке Лагранжа, реализованной в ПК ANSYS Mechanical.

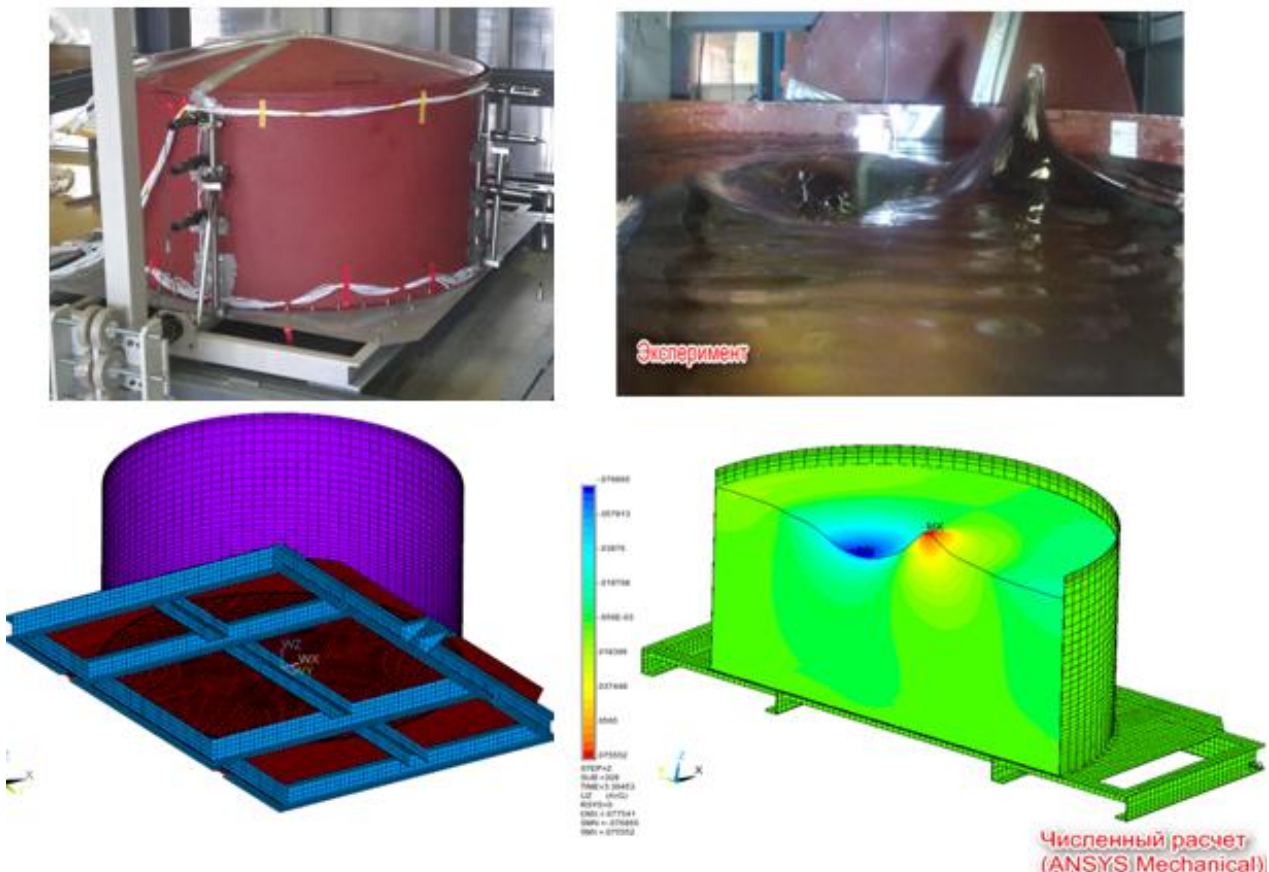


Рис. 6. Экспериментальная установка и ее КЭ-модель. Форма и высота волны, $t=3.4$ с. Максимальная высота волны 7.5 см

В динамической реакции системы четко проявляются низкочастотные общесистемные колебания системы «подпружиненная рама – объект исследования» на частоте, определяемой жесткостью пружин и массой установки. Выявлены сложные динамические картины волнообразования в резервуаре, при этом достигнуто качественное (форма колебаний жидкости) и количественное (высота волны) соответствие результатов численных расчетов с экспериментом (рис.6). Выполненными «верификационными» расчетами физических моделей подтверждена эффективность разработанной адаптивной методики моделирования поведения системы «подвижная рама – тонкостенный резервуар – жидкость» в варианте *эйлерова* похода связанной гидроупругой постановки.

В четвертой главе представлена апробация методики на реальной гидроупругой системе «тонкостенные днище, стенка переменного сечения, ребристая крышка, понтон – вязкая жидкость (тяжелая нефть)» резервуара РВСПА-50000 при действии статических нагрузок (собственный вес, снеговая нагрузка и гидростатическое давление) и горизонтального сейсмического воздействия (заданного синтезированной 8-балльной акселерограммой для района площадки строительства резервуара с использованием альтернативных численных подходов (*постановка Лагранжа* в ПК ANSYS и *ALE* в ПК ABAQUS Explicit).

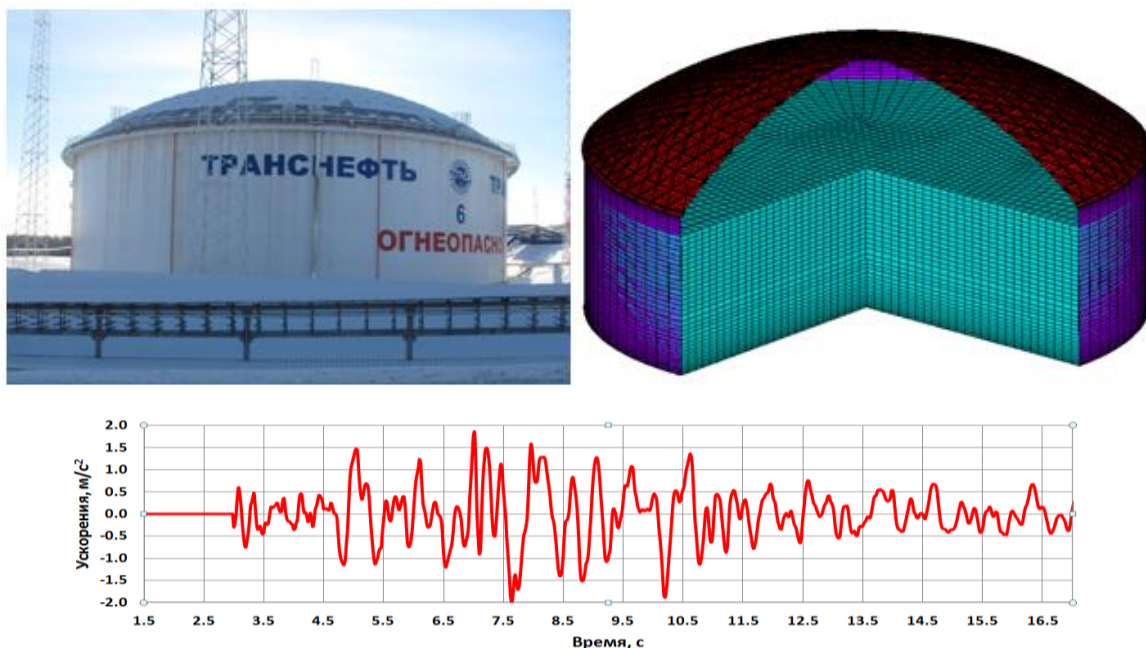


Рис. 7. Резервуар РВСПА-50000. Реальный объект и КЭ-модель (сверху), расчетная 8-балльная акселерограмма (снизу)

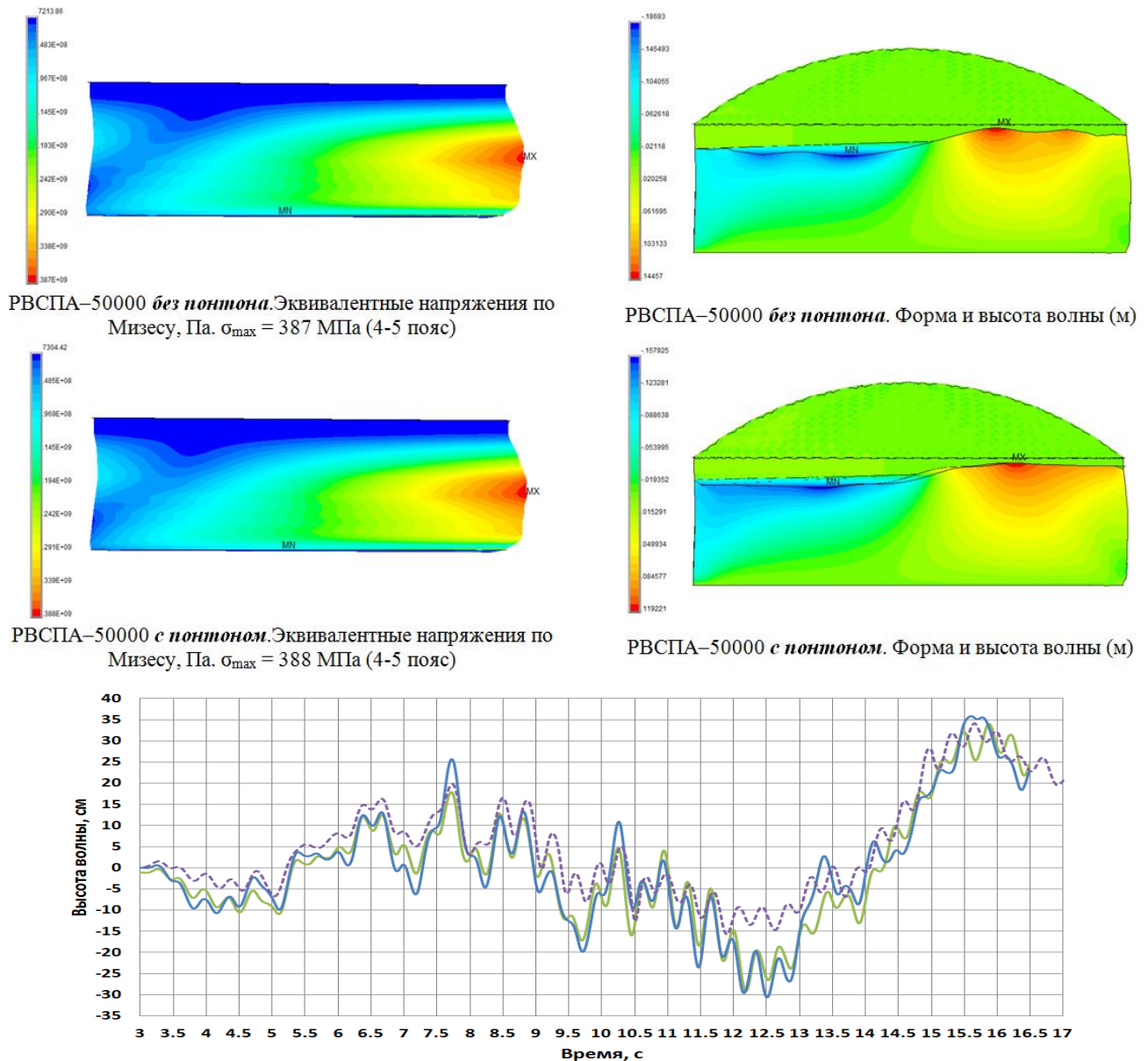


Рис. 8. Резервуар РВСПА-50000, 100% взлив. Результаты гидроупругого динамического расчета при 8-балльном сейсмическом воздействии с учетом гидростатики. Сверху: сопоставленные результаты с учетом понтона и без, $t=11.64$ с, в постановке *Лагранжа*. Снизу: результаты с учетом понтона (замоделированном тремя способами) – высота волны вблизи стенки резервуара во времени в плоскости действия сейсмического воздействия (сплошные линии – в постановке *Лагранжа*, пунктир – в постановке *ALE*)

Контакт края понтона со стенкой моделировался в трех вариантах: совместное радиальное деформирование; через двусторонние упругие радиальные связи (пружины жесткостью, эквивалентной реальной сильфонной); односторонний контакт (при выборе зазора 15 см).

Качественный характер сейсмического НДС стенки резервуара соответствует упрощенным аналитическим моделям гидродинамического давления на жесткую стенку и присоединенных масс. При этом максимальные амплитуды

численных динамических параметров НДС стенки (перемещений, деформаций, напряжений) по разработанной адаптивной методике существенно превосходят нормативно-аналитические значения. Объяснений этому принципиальному количественному расхождению может быть дано несколько: 1) квазистатический характер приложения сейсмической (инерционной) нагрузки, не учитывающий реальные динамические свойства заданной акселерограммы землетрясения; 2) неучет в квазистатических методиках сложного динамического характера колебаний связанной системы «тонкостенная оболочка-жидкость»; 3) гипотеза о жесткой вертикальной стенке резервуара, принятая в нормативно-аналитической методике.

Связанный динамический характер гидроупругого решения проявляются при сравнительном рассмотрении вариантов с понтоном и без понтона. При близости параметров НДС стенки резервуара максимальная высота волны увеличилась за счет сглаживания «ряби» на поверхности.

На основе полученных результатов расчетных исследований показана практическая значимость и эффективность разработанной адаптивной методики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. По результатам аналитического обзора существующих отечественных и зарубежных нормативных, экспериментальных и теоретических подходов выполнена классификация значимых задач строительной аэрогидроупругости с позиции физики явлений и их математического/численного моделирования.

2. Разработана адаптивная методика численного моделирования связанных динамических задач строительной аэрогидроупругости, гибко настраиваемая на объект и задачу исследования, содержащая современные эффективные альтернативные подходы (*лагранжев, эйлеров и смешанный*), модели и численные схемы. Методика реализована на основе междисциплинарных программных комплексов (прежде всего, ANSYS) и собственных программных разработок автора.

3. На серии тестовых задач, имеющих аналитическое, экспериментальное и (или) альтернативное численное подтверждение, проведена верификация и «настройка» параметров разработанной методики. Обоснованы практически реализуемые постановки трехмерных связанных задач аэрогидроупругости.

4. Так, на выполненной многопараметрической верификационной задаче (известный «общемировой» тест с объемным обтеканием прямоугольной призмы) показано, что реализация альтернативных моделей турбулентности даже при подробной дискретизации приводит к значимому разбросу в определении пульсационной составляющей аэродинамического давления и пространственно-временных характеристик потока. Этот вывод определил выбор моделей и методов дальнейших исследования связанных задач аэрогидроупругости.

5. На связанной динамической верификационной задаче аэрогидроупругости – нелинейные колебания гибкой упругой балки в спутном следе за жестким цилиндром – оптимизированы параметры дискретных моделей и методов расчета, обеспечившие близость полученных результатов к «эталонным» данным в значимом диапазоне характеристик ламинарного потока.

6. На верификационных задачах гидроупругости, имеющих экспериментальные эталонные решения, показано соответствие и обоснованы диапазоны применимости альтернативных численных подходов моделирования жидкости со свободной поверхностью в резервуаре при кинематических динамических воздействиях.

7. Проведена апробация адаптивной методики на реальном объекте с сильным проявлением трехмерных динамических эффектов гидроупругости – тонкостенном металлического резервуаре с жидкостью большой емкости ($50\,000\text{ м}^3$) с подкрепленной эллиптической крышей и плавающим понтоном. Показана эффективность методики с использованием альтернативных подходов (*лагранжев* и *смешанный*) и возможность использования более «экономичного» *лагранжева* для исследования динамики системы при интенсивном сейсмическом воздействии, заданном синтезированной акселерограммой.

8. Связанный динамический характер и слабая предсказуемость гидроупругого решения в наибольшей степени проявляются при сравнительном рассмотрении вариантов с весьма гибким понтоном и без понтона – при близости параметров НДС стенки резервуара максимальная высота волны увеличилась за счет ее выполаживания (сглаживания «ряби» на поверхности).

9. Представленные результаты диссертационного исследования позволяют рекомендовать разработанную адаптивную методику к применению для широкого класса аэрогидроупругих динамических систем строительства – резервуары с жидкостью, высоконапорные арочные плотины с водохранилищем, тонкостенные гидрозатворы с бассейном (при сейсмических воздействиях), высотные здания, мосты, рекламные щиты (в ветровом потоке) и др. При этом требуют дальнейшего обоснования и развития как математические модели (прежде всего, турбулентности для ветровых потоков), так и численные схемы их реализации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме исследования было опубликовано 25 статей, из них 13 из перечня ВАК:

1) Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н. «Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик и исследования реальных объектов». *International Journal of Computational Civil and Structural Engineering*, Volume 6, Issue 1&2 – г. Москва, 2010 г., стр. 67-69.

2) Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Аул А.А., Афанасьева И.Н., Нагибович А.И. «Верификация ПК ANSYS Mechanical для задач строительного профиля (в системе RAACH). Опыт и перспективы». *International Journal of Computational Civil and Structural Engineering*, Volume 6, Issue 1&2 – г. Москва, 2010 г., стр. 70-72.

3) Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Аул А.А., Афанасьева И.Н., Нагибович А.И. «Расчетное обоснование НДС, прочности и устойчивости уникальных зданий и сооружений. Опыт 2009-2010 гг.». *International Journal of*

Computational Civil and Structural Engineering, Volume 6, Issue 1&2 – г. Москва, 2010 г., стр. 73-74.

4) Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н. «Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик ветровых воздействий и исследование реальных объектов». Научно - технический журнал Вестник МГСУ, №4, Т.5. – г. Москва, 2012 г., стр. 182 - 185.

5) Афанасьева И.Н. «Сравнительный анализ результатов численного и экспериментального моделирования турбулентного воздушного потока в зоне прямоугольной призмы». International Journal of Computational Civil and Structural Engineering, Volume 8, Issue 3 – г. Москва, 2012 г., стр. 50-57.

6) Афанасьева И.Н., Усманов А.Р. «Изучение трехмерной структуры воздушного турбулентного потока при обтекании призмы прямоугольной формы». International Journal of Computational Civil and Structural Engineering, Volume 7, Issue 3 – г. Москва, 2011 г., стр. 43-49.

7) Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н., Котов Ф.М., Петряшев С.О., Петряшев Н.О. «Computational simulation of external extreme impacts on NPP constructions. Developments and investigations", International Journal for Computational Civil and Structural Engineering ». International Journal of Computational Civil and Structural Engineering, Volume 9, Issue 4 – г. Москва, 2013 г., стр. 23-33.

8) Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н., Котов Ф.М., Вершинин В.В., Щербина С.В., Петряшев С.О., Петряшев Н.О. «Numerical Analysis of Wind loading, Stress-strain State, Dynamics, Strength and Stability of Load-bearing Concrete Structures of NPP Evaporative Cooling Towers». International Journal of Computational Civil and Structural Engineering, Volume 9, Issue 4 – г. Москва, 2013 г., стр. 34-43.

9) Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Павлов А.С., Кайтуков Т.Б., Афанасьева И.Н. «О разработке, исследовании и верификации корректных численных методов решения нелинейных задач деформирования, устойчивости и закритического поведения тонкостенных оболочечно-стержневых конструкций».

Строительная механика и расчет сооружений, 5 (256) – г. Москва, 2014 г., стр.7-13.

10) Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Кайтуков Т.Б., Афанасьева И.Н., Вершинин В.В., Дмитриев Д.С., Усманов А.Р., Чужинов А.С., Щербина С.В. «Постановка, конечноэлементная аппроксимация и алгоритмы решения задач расчетного обоснования связанных систем «сооружение–жидкость»». Строительная механика и расчет сооружений, 5 (256) – г. Москва, 2014 г., стр.21-27.

11) Афанасьева И.Н., Ланцова И.Ю. «Моделирование двумерного нестационарного обтекания гибкой упругой конструкции в связанной постановке. Часть 1: верификация методики численного моделирования поведения жидкости». International Journal of Computational Civil and Structural Engineering, Volume 10, Issue 3 – г. Москва, 2014 г., стр. 23-32.

12) Афанасьева И.Н., Ланцова И.Ю. «Моделирование двумерного нестационарного обтекания гибкой упругой конструкции в связанной постановке. Часть 2: верификация методики численного моделирования связанной задачи аэрогидроупругости». International Journal of Computational Civil and Structural Engineering, Volume 10, Issue 3 – г. Москва, 2014 г., стр. 33-39.

13) Афанасьева И.Н. «Моделирование двумерного нестационарного обтекания гибкой упругой конструкции в связанной постановке. Часть 3: верификация методики численного моделирования поведения гибкой упругой конструкции». International Journal of Computational Civil and Structural Engineering, Volume 10, Issue 3 – г. Москва, 2014 г., стр. 40-48.

Публикации в реферируемых зарубежных изданиях:

14) Afanasyeva Irina N., Usmanov Anton. R., Belostotskiy Alexandr M. «Specific aspects of numerical simulation of civil engineering structures with cross section shape close to rectangular». Congress Proceedings: WCCM XI – ECCM V – ECFD VI. – Barcelona, July 20-25, 2014. – pp. 7132-7143.

15) Belostotskiy A., Dubinsky S., Afanasyeva I., Kotov F., Vershinin V., Scherbina S., Petryashev S, Petryashev N. «External Extreme Impacts on NPP Constructions – Methodology of Computational simulation». Advanced Materials Research, Volume 1040 – 2014, pp. 472-477.