

ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ТЕСИС»

**Труды
Международного форума**

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ–2016

4–5 апреля 2016 г.



МОСКВА – 2016

УДК 62.001.572

ББК 30в6

И62

Тексты печатаются в авторской редакции

Инженерные системы–2016: Труды Международного форума:
И62 Москва, 4–5 апреля 2016 г. / Инжиниринговая компания
«ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2016. – 200 с.
ISBN 978-5-317-05347-5

Данный сборник включает в себя доклады участников Международного форума «Инженерные системы–2016», сгруппированные по тематикам, состоявшихся в рамках форума ежегодных конференций пользователей программных продуктов: FlowVision, SIMULIA Abaqus и DEFORM. Вы сможете ознакомиться с докладами, посвященными решению различных задач в таких областях, как прочность и долговечность конструкции, аэро-, газо- и гидродинамика, промышленная безопасность, оптимизация, взаимодействие жидкости и конструкции, обработка металлов давлением. В докладах отражен современный уровень использования программных продуктов в инженерной практике.

Труды Международного форума «Инженерные системы–2016» будут интересны инженерам, занимающимся аналогичными задачами, а также аспирантам, студентам и преподавателям высших учебных заведений технического профиля.

УДК 62.001.572
ББК 30в6

СОДЕРЖАНИЕ

Конференция пользователей FlowVision

*Жаркова В.В., Щеляев А.Е., Дядькин А.А., Павлов А.О.,
Симакова Т.В.*

[Расчет гидродинамических воздействий на возвращаемый аппарат
\(ВА\) при посадке на воду](#) 6

Маркова Т.В., Аксенов А.А., Жлуктов С.В.

[Моделирование гиперзвукового аппарата Hexafly](#)..... 15

Мещеряков А.Н., Михайлова М.К., Фишер Ю.В., Щеляев А.Е.

[Определение рабочих характеристик воздухоохладителя](#)..... 22

Михайлова М.К., Щеляев А.Е.

[Описание функционала «подвижное тело» в FlowVision](#) 31

Евграфова А.В., Попова Е.Н., Сухановский А.Н.

[Влияние сеточного разрешения на результаты расчетов
мелкомасштабных конвективных течений при помощи
программного комплекса FlowVision](#) 34

Фишер Ю.В., Щеляев А.Е.

[Верификация расчетных характеристик сверхзвуковых
турбулентных струй](#)..... 45

Дядькин А.А., Павлов А.О., Симакова Т.В., Чёткин С.В.

[Анализ возможности использования программного комплекса
FlowVision для исследования гидродинамических воздействий
на возвращаемый аппарат и динамики его движения при посадке
на воду](#)..... 57

Бегиишева Л.Р.

[Моделирование падения бутылки с водой](#)..... 66

Бегиишева Л.Р.

[Моделирование клапана гидравлического устройства](#) 72

Закирничная М.М., Адеев И.Ю., Передерей Т.И., Исанчурина Г.Ф.

[Специфика моделирования газодинамики с абразивными частицами
в трубопроводе с использованием ПК FlowVision](#) 78

Конференция пользователей SIMULIA Abaqus

Коротков В.А., Иванов А.П.

<u>О применимости модального метода динамического анализа в расчётах строительных конструкций АЭС при падении самолёта и при сейсмическом воздействии</u>	94
---	----

Романов А.В.

<u>Численное моделирование системы преднапряжения защитных оболочек АЭС с использованием функций форм «неправильного» гексаэдра</u>	106
---	-----

Каширин Б.А.

<u>Использование PYTHON-скриптов при моделировании таблеточных твэлов</u>	119
---	-----

Перцукова У.А, Воронков В.И.

<u>Моделирование штамповки деталей из листового материала эластичной средой</u>	131
---	-----

Дмитриева А.С., Лягова А.А.

<u>Анализ напряженно-деформированного состояния стального цилиндрического резервуара с учетом эксплуатационного дефекта типа «вмятина» с использованием SIMULIA Abaqus</u>	141
--	-----

Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н.

<u>Моделирование с помощью SIMULIA Abaqus физических процессов в структурно неоднородных материалах на основе метода параметрического усреднения</u>	151
--	-----

Конференция пользователей DEFORM

Самусев С.В., Жигулев Г.П., Фадеев В.А.

<u>Анализ результатов расчета напряженно деформированного состояния трубной заготовки участка ПШФ линии ТЭСА 1420</u>	179
---	-----

Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Скрипаленко М.М.

<u>Моделирование температурного поля воздушных фурм доменных печей</u>	189
--	-----

**КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ
FLOWVISION**

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВОЗВРАЩАЕМЫЙ АППАРАТ (ВА) ПРИ ПОСАДКЕ НА ВОДУ

Дядькин А.А.¹, Павлов А.О.¹, Симакова Т.В.¹
Жаркова В.В.², Щеляев А.Е.²

¹ ОАО «РКК Энергия», г. Королев, Россия

² ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

В работе представлены качественные результаты моделирования приводнения возвращаемого аппарата (ВА) пилотируемого транспортного корабля нового поколения в условиях штиля и морского волнения. Рассмотрены случаи посадки ВА как с работающими, так и с выключенными двигательными установками.

В процессе приземления исследовались гидродинамические воздействия на ВА, рассматривалась динамика его движения, изучалась остойчивость ВА после приводнения.

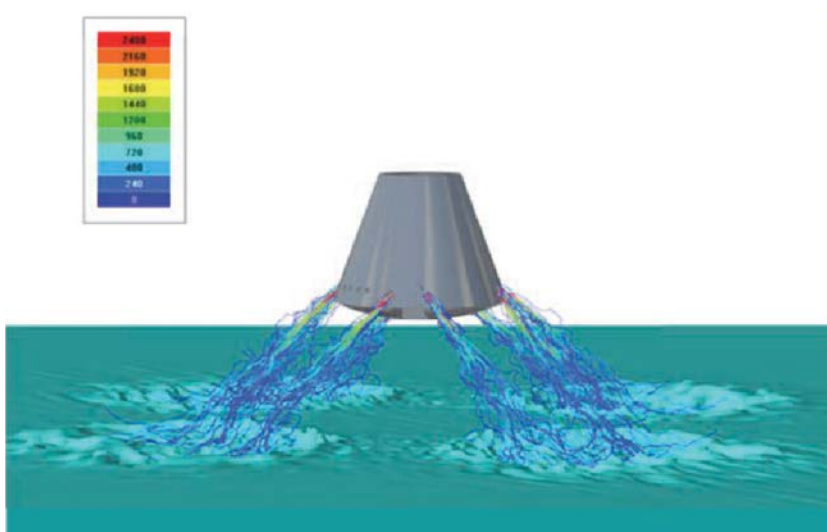


Рисунок 1 – Визуализация ВА в процессе приводнения. Показана форма водной поверхности и распределение скоростей в виде линий тока, м/с

Более 5 лет компания «ТЕСИС» сотрудничает с ОАО РКК «Энергия», помогая в решении различных задач в рамках проекта по созданию нового космического корабля «Федерация». Одной из таких задач является моделирование приводнения возвращаемого аппарата (ВА) пилотируемого транспортного корабля (ПТК). Возвращаемый аппарат показан на Рисунке 1. Схематично он представляет собой усеченный конус со сферическим дном.



Рисунок 2 – Внешний вид возвращаемого аппарата

В штатном режиме ВА с помощью парашютно-реактивной системы совершает посадку на твердую поверхность (землю), но в нештатной ситуации допускается посадка на водную поверхность. В этом случае возникает необходимость исследования динамики поведения ВА и определения гидродинамических воздействий на конструкцию аппарата. Определение полей давления по поверхности корпуса ВА в различные моменты его погружения в водную среду позволяет сформировать исходные данные для прочностных расчетов, а структура течения воздуха и жидкости вблизи ВА дает понимание физических процессов взаимодействия аппарата с водой.

Вначале ВА движется на парашюте. В 10 метрах над поверхностью посадки (вода или грунт) парашюты отстреливаются и включаются сопловые установки, работающие до тех пор, пока ВА не коснется воды. Дополнительно моделируются случаи, когда сопловые установки не работают при снижении под углом в спокойную воду или на волнение. На Рисунке 3 показан внешний вид расчетной модели ВА с отделившимся лобовым тепло-

защитным экраном (ЛТЭ) и убранными в ниши защитного экрана посадочными устройствами.

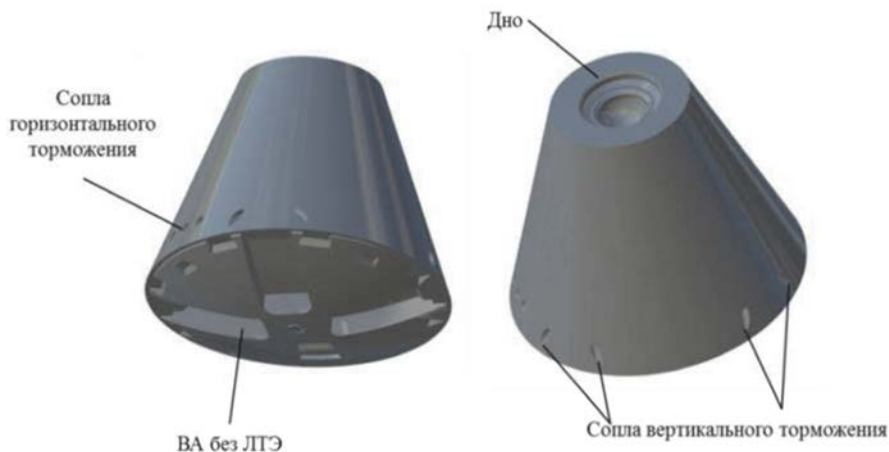


Рисунок 3 – Расчетная модель ВА

Задача приводнения ВА решается в двухфазной постановке (фаза воды и фаза воздуха), причем параметры течения в каждой фазе резко отличаются друг от друга по величине плотности и скорости распространения звука. Истечение продуктов сгорания из сопловых установок характеризуется высокими скоростями и давлениями, что усложняет задачу, по сравнению со свободным падением ВА в воду. В расчетах используется упрощение постановки задачи, в котором при взаимодействии горячих струй с водой кипение, испарение и образование водяного пара не учитывается. Газовые струи только нагревают и вытесняют воду.

Моделирование приводнения ВА занимает длительное время, что связано с особенностями явного расчета уровня границы раздела фаз (свободной поверхности). Для получения качественных результатов свободная поверхность должна моделироваться с большим количеством расчетных ячеек, но при этом за один шаг интегрирования перемещаться не более чем на одну ячейку. Сечение расчетной сетки для одного из вариантов показано на Рисунке 4.

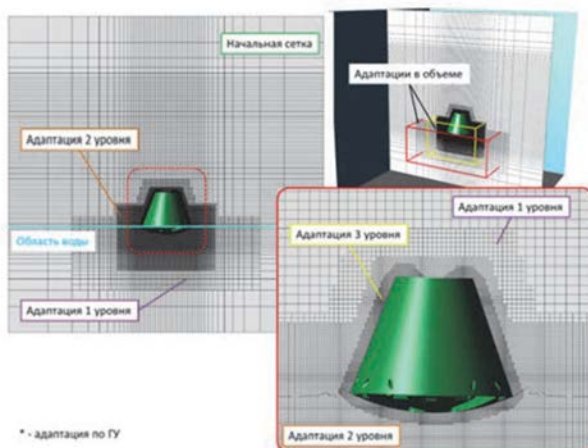


Рисунок 4 – Расчетная сетка для приводнения ВА с неработающими сопловыми установками

Средний шаг интегрирования в задачах составляет $2 \cdot 10^{-5}$ секунд, а весь процесс приводнения занимает около 5 – 6 секунд. Таким образом, для решения одной задачи нужно около 200 000 итераций. Для ускорения процесса получения решения использовался кластер.

Задача решалась в симметричной постановке, расчетная область и постановка граничных условий представлены на Рисунке 5. Размер расчетной области составил 20 x 60 x 30 м.

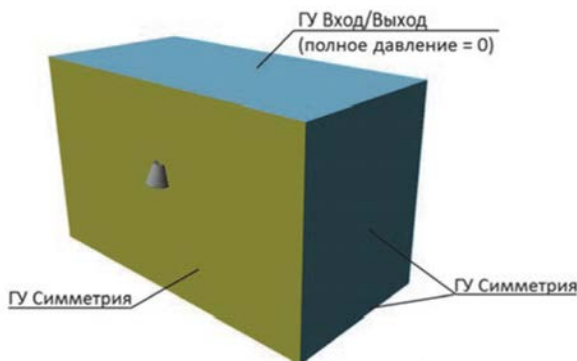


Рисунок 5 – Расчетная область и постановка граничных условий

В результате моделирования были получены аэродинамические характеристики и нагрузки, действующие на ВА, а также динамическая картина поведения ВА.

Ниже приведены результаты для одного из рассмотренных вариантов посадки в нештатном режиме с неработающими соплами ПТДУ (с нулевым углом атаки). При свободном движении с высоты 10 метров аппарат разгоняется и к моменту касания водной поверхности его скорость увеличивается до 16м/с. При контакте с водой происходит резкое торможение ВА с последующим его погружением в водную среду (Рисунок 6).

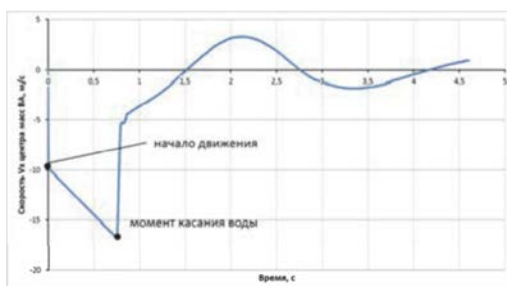


Рисунок 6 – Изменение вертикальной скорости центра масс ВА
(сопловые установки отключены)

Максимальная глубина погружения центра масс аппарата достигает 1 метр. Далее наблюдается несколько затухающих колебаний ВА на границе раздела сред (Рисунок 7).

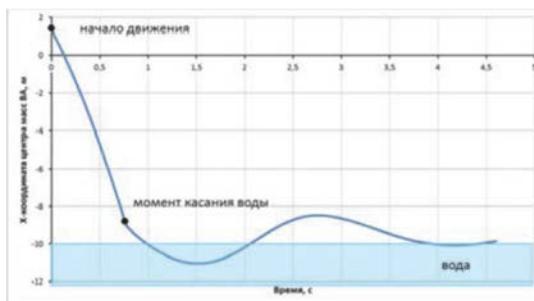


Рисунок 7 – Изменение X - координаты центра масс ВА
(сопловые установки отключены)

На Рисунке 8 представлена эпюра давления по образующим корпуса и ЛТЭ в продольном сечении ВА в момент касания воды.

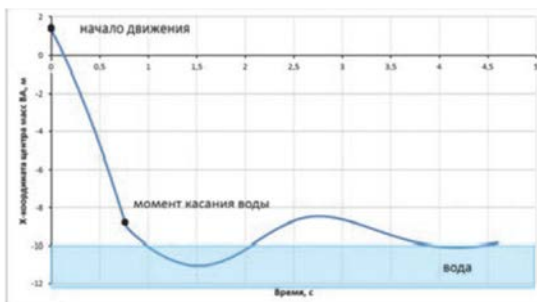


Рисунок 8 – Эпюра давления в продольном сечении ВА в момент касания воды

Центр масс аппарата смещён от его продольной оси по нормальной координате, что приводит к увеличению угла тангажа θ от 0 до $\sim 3^\circ$. В результате при входе в воду под ненулевым углом тангажа эпюры распределения давления на поверхности корпуса имеют асимметричный характер относительно плоскости симметрии аппарата. В результате удара о воду, избыточное, по сравнению с атмосферным, давление на гладкой поверхности защитного экрана, за малый промежуток времени ($\Delta t \sim 0,02$ с), возрастает от 0 до $\sim 570\,000$ Па.

На Рисунке 9 показано распределение давления по ЛТЭ в момент касания воды.

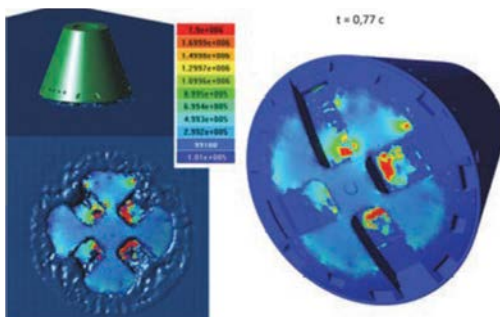


Рисунок 9 – Распределение давления по экрану ВА в момент касания воды

В момент касания водной поверхности осредненное по смоченной поверхности избыточное давление составляет ~ 800000 Па. В последующие моменты времени давление резко уменьшается по величине и меняет знак. Локальное максимальное давление в критической точке в момент касания воды достигает значений $19\,000\,000$ Па.

На Рисунке 10 показана эпюра давления в поперечном сечении ВА в момент максимального погружения в воду. Видно, что давление на поверхности защитного экрана уменьшается, и величина разрежения на эпюре достигает значений $-14\,500$ Па.

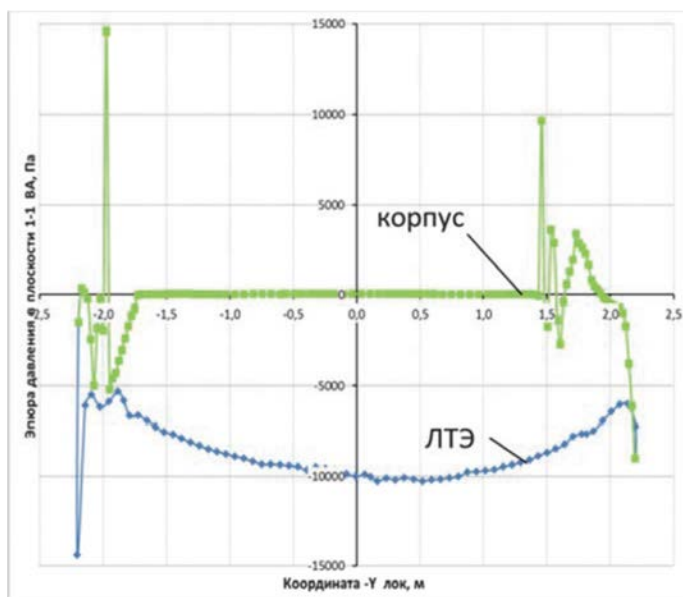


Рисунок 10 – Распределение давления по экрану ВА в момент максимального погружения ВА

Ниже рассмотрены результаты, полученные для варианта посадки на гладкую водную поверхность с углом атаки 15 градусов и угловой скоростью 30 град/с.

ВА начинает движение с начальной скоростью 8 м/с, в момент касания воды ($t = 0,259$ с) сопла отключаются, скорость ВА составляет $1,053$ м/с. Далее ВА совершает падение в каверну, образованную газовыми струями, и снова выталкивается водой вверх (Рисунок 11).

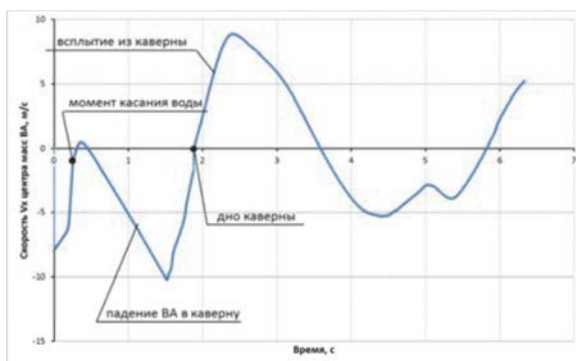


Рисунок 11 – Изменение вертикальной скорости центра масс ВА (ПТДУ включены)

В местах взаимодействия струй с водой образуются каверны. Волны поднимаются навстречу ВА на высоту до 2,3 м. После отключения сопел аппарат продолжает крениться на бок и падает в вырытую каверну. Далее вода выталкивает ВА вверх (Рисунок 12).

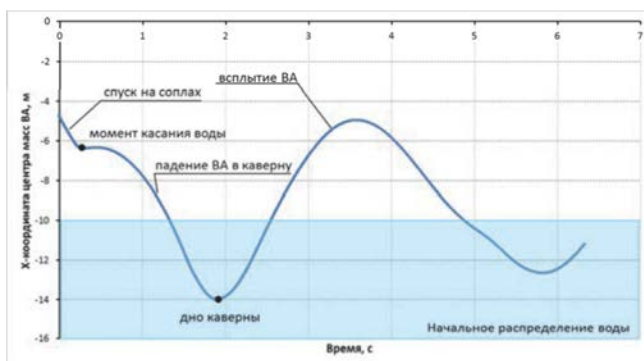


Рисунок 12 – Изменение X - координаты центра масс ВА (ПТДУ включены)

Положение ВА в момент отключения сопел, а также эпюра давления в продольном сечении ВА и распределение давления по ЛТЭ показаны на Рисунке 13.

Максимальные значения давления в локальных точках достигают значений около 700 000 Па, средние значения составляют порядка 2 50 000 Па.

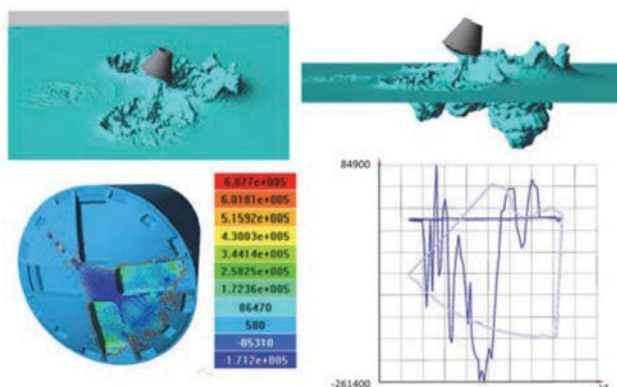


Рисунок 13 – Положение ВА, распределение давления по ЛТЭ и эпюра в поперечном сечении ВА в момент отключения сопел (ПТДУ включены)

В момент максимального погружения ВА растет величина разрежения на экране, минимальные значения избыточного давления составляют минус 34 900 Па (Рисунок 14).

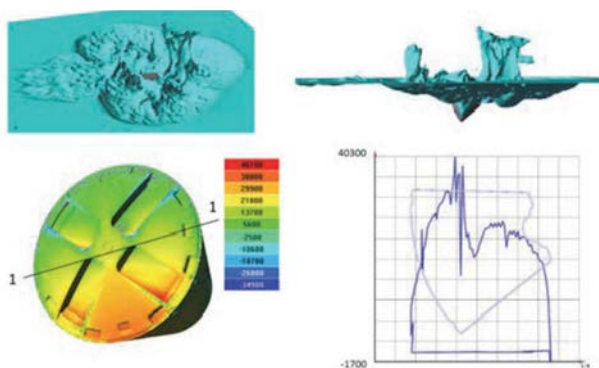


Рисунок 14 – Положение ВА, распределение давления по ЛТЭ и эпюра в поперечном сечении ВА в момент максимального погружения (ПТДУ включены)

В результате моделирования были выявлены основные особенности динамики взаимодействия аппарата с водной средой. Определены гидродинамические силы и моменты, действующие на ВА при приводнении и в процессе движения в водной среде. Проведенные исследования показали,

что случай приведения аппарата, в силу больших гидродинамических воздействий и продольных перегрузок, следует рассматривать как один из основных расчётных случаев при анализе нагружения и прочности конструкции корпуса, в особенности это относится к защитному экрану и отсекам приборного оборудования ВА. Для выявления предельных значений воздействий на аппарат необходимо проведение дальнейших расчётных исследований с учётом реальных жесткостных характеристик защитного экрана и лобового теплозащитного экрана в случае несрабатывания средств его отделения. Численные результаты требуют валидации с экспериментальными моделями.

Список литературы:

1. Антонова Н.П., Брюханов Н.А., Четкин С.В. «Средства посадки пилотируемого транспортного корабля нового поколения». Космическая техника и технологии, 2014, № 4(7), с. 21-30.
2. John T. Wang, Karen H. Lyle. «Simulating Space Capsule Water Landing with Explicit Finite Element Method», NASA Langley Research Center, Hempton, V.A., 23681.
3. «FlowVision». Руководство пользователя», ООО «ТЕСИС», Москва, 2005.
4. Aksenov A, Dyadkin A, Pokhilko V. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method // Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP-Vol. 377-2., 1998. pp 79-86.
5. А.А. Аксенов, А.А. Дядькин, С.А. Харченко. Исследование эффективности распараллеливания расчета движения подвижных тел, и свободных поверхностей в FlowVision на компьютерах, с распределенной памятью//Вычислительные методы и программирование; 2009, т10, №1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО АППАРАТА HEXAFLY

Маркова Т. В., Аксенов А. А., Жлуктов С. В.
ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

Hexafly - перспективный высокоскоростной гражданский летательный аппарат на водородном топливе. В данной работе рассмотрена его масштабная модель, которая была изготовлена и испытана в аэродинамиче-

ской трубе. Продувки проводились при различных числах Маха, углах атаки, с горением и без горения водорода в прямоточном воздушно-реактивном двигателе.

Целью работы заключается в численном исследовании течения около масштабной модели аппарата HEXAFLY в аэродинамической трубе и верификации программного комплекса (ПК) FlowVision. Особенностью численной постановки задачи является то, что расчётная область ограничена стенками аэродинамической трубы, внешней и внутренней поверхностями модели, а также – поверхностью державки. Таким образом, в расчётах учитывается влияние стенок трубы и державки. Для моделирования взяты условия испытаний холодной продувки (без горения водорода), соответствующих числу Маха $M=7$ и углу атаки $\alpha = -2^\circ$.

Рассчитанные аэродинамические характеристики модели сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

Постановка задачи в ПК FlowVision: геометрия и граничные условия

Использовавшаяся в экспериментах масштабная модель ЛА HEXAFLY показана на Рисунке 15.

Модель установлена в аэродинамической трубе, снабжённой коническим сверхзвуковым соплом. Данная геометрия симметрична относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии сопла и камеры аэродинамической трубы. Это позволяет экономить вычислительные ресурсы, проводя расчёты в полупространстве.

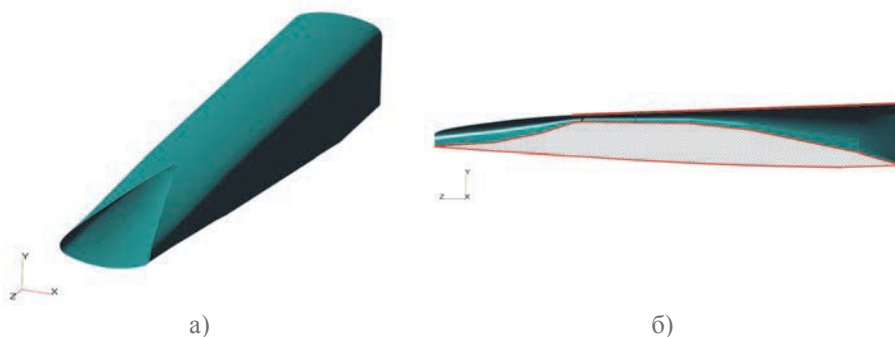


Рисунок 15 – Масштабная модель ЛА HEXAFLY:

а) общий вид, б) сечение плоскостью симметрии

Модель установлена в аэродинамической трубе, снабжённой коническим сверхзвуковым соплом. Данная геометрия симметрична относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии сопла и камеры аэродинамической трубы. Это позволяет экономить вычислительные ресурсы, проводя расчёты в полупространстве.

Рисунок 16 иллюстрирует проточную часть аэродинамической трубы с установленной в ней моделью ЛА HEXAFLY под углом атаки -2° . Здесь же показана расстановка граничных условий.

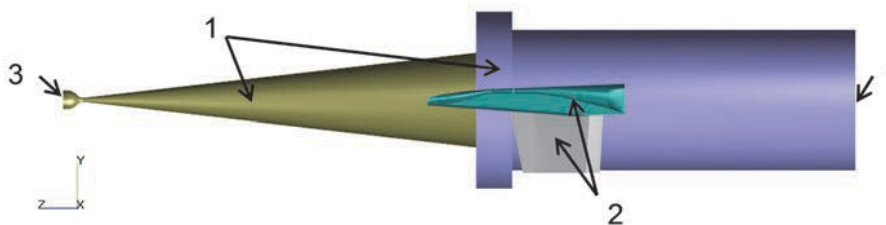


Рисунок 16 – Вид проточной части трубы с установленной моделью ЛА HEXAFLY

Граничные условия:

1 – стенки сопла и аэродинамической трубы; 2 – стенки модели HEXAFLY и державки; 3 – вход; 4 – выход

Предполагается, что вход в подводящее сопло '3' дозвуковой. Здесь задаются полное давление $P_0 = 6,4$ атм. и полная температура $T_0 = 2310$ К. Эти значения соответствуют условиям эксперимента. Рабочим веществом является газовая смесь, представляющая собой продукты сгорания метана (CH_4). Его свойства (молярная масса, удельная теплоёмкость при постоянном давлении, вязкость и теплопроводность) были рассчитаны в предположении термо-химического равновесия при фиксированных значениях давления (p) и температуры (T) и заданы в виде таблиц T и p . Указанные входные условия обеспечивают значение числа Маха 7 на выходе из сопла. Этот поток натекает на модель. Условие сверхзвукового выхода задаётся на поверхности '4', расположенной за моделью. На плоскости симметрии задаётся условие симметрии. Стенки (поверхности '1' и '2') полагаются адиабатическими. На них задаётся условие прилипания.

Постановка задачи в ПК FlowVision: расчётная сетка

Предварительные расчёты проводились на различных расчётных сетках. Обсуждаемые ниже результаты были получены на 2х сетках построенных следующим образом. Начальная сетка – однородная. Размер ячеек – 0.1 м. Сетка адаптирована в подводящем сопле аэродинамической трубы и около модели – см. Рисунок 19. Были заданы три вида адаптации: адаптация в объёме геометрического объекта (первого, второго и третьего уровней), адаптация около поверхностей модели (4 и 8 слоев ячеек пятого уровня для первого и второго вариантов расчетной сетки) и адаптация к решению около модели (адаптация по градиентам статического давления и статической температуры до пятого уровня). Размер расчетной сетки первого варианта был ограничен количеством ячеек адаптации по решению в 4 млн. ячеек, второй вариант имел ограничение в 8 млн. ячеек. В результате количество расчетных ячеек первой сетки составило 3,2 млн. ячеек и второй – 7,1 млн. ячеек. На Рисунке 17 показаны расчетные сетки вокруг передней части модели ЛА для двух сеток расчётная сетка содержит около 3,2 миллионов ячеек.

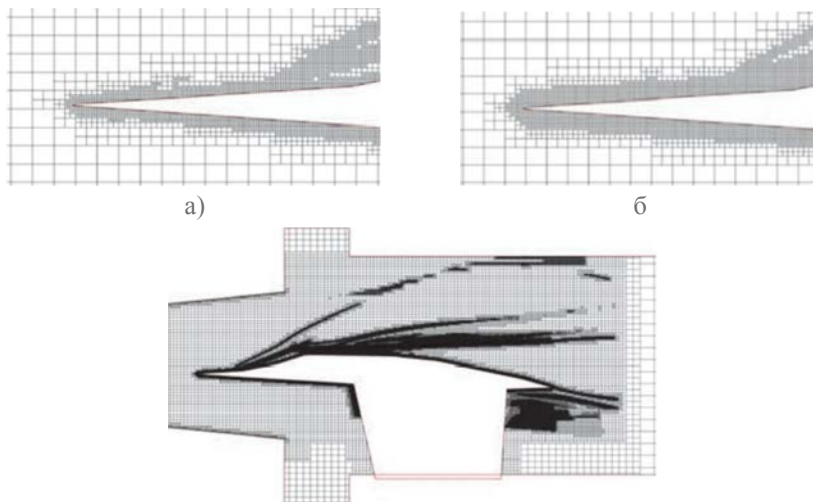


Рисунок 17 – Расчетная сетка:

- а) адаптация на передней кромки модели ЛА для первого варианта сетки
- б) адаптация на передней кромки модели ЛА для первого варианта сетки
- в) адаптация вокруг модели ЛА

Подчеркнём, что такого рода сетка (с применением адаптации по решению) меняется во времени до тех пор, пока не достигнуто стационарное решение: ячейки дробятся и сливаются в процессе развития решения.

Постановка задачи в ПК FlowVision: используемые модели

В ПК FlowVision интегрируются следующие уравнения и модели: уравнение неразрывности; уравнение импульсов; уравнение энергии; ‘Стандартная’ $k - \varepsilon$ модель турбулентности с моделью пристеночных функций FlowVision.

4. Постановка задачи в ПК FlowVision: шаг по времени

Шаг интегрирования уравнений по времени задаётся посредством ввода числа Куранта-Фридрихса-Леви (CFL) в интерфейсе FlowVision. В обсуждаемых расчетах $CFL = 10$, что соответствовало шагу по времени приблизительно $3.7 \cdot 10^{-7}$ с.

Расчёты

На Рисунках 18–20 показаны распределения числа Маха, статического давления и статической температуры в плоскости симметрии.

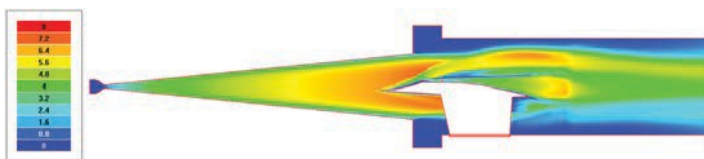


Рисунок 18 – Распределение числа Маха в плоскости симметрии

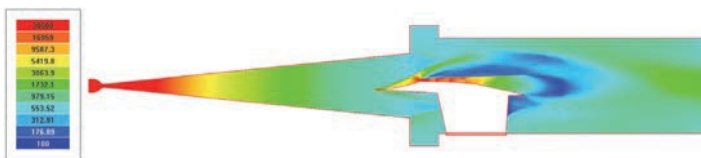


Рисунок 19 – Распределение статического давления в плоскости симметрии, Па

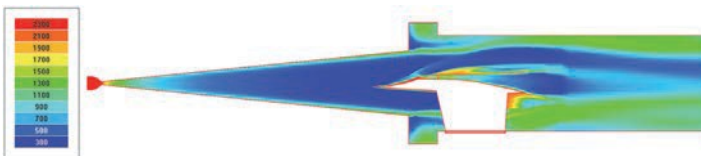


Рисунок 20 – Распределение статической температуры в плоскости симметрии, К

На Рисунке 21 показаны линии установки датчиков давления на поверхности модели.

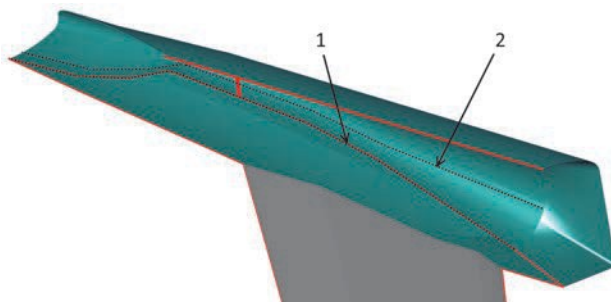


Рисунок 21 – Расположение датчиков давления на поверхности ЛА HEXAFLY: 1 – центральная линия установки датчиков давления (в плоскости симметрии); 2 – боковая линия установки датчиков давления

Распределения давления вдоль линий установки датчиков давления показаны на Рисунках 22 и 23.

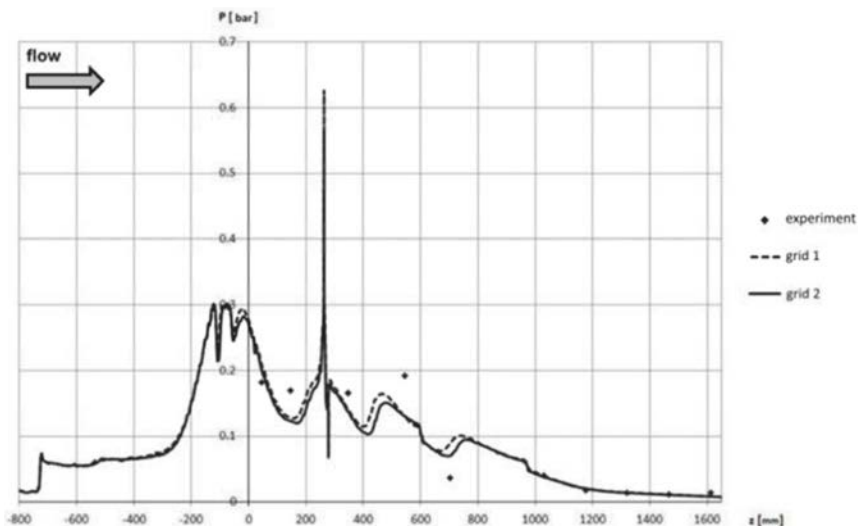


Рисунок 22 – Распределение статического давления вдоль центральной линии установки датчиков давления, бар (линия 1 на Рисунке 21)

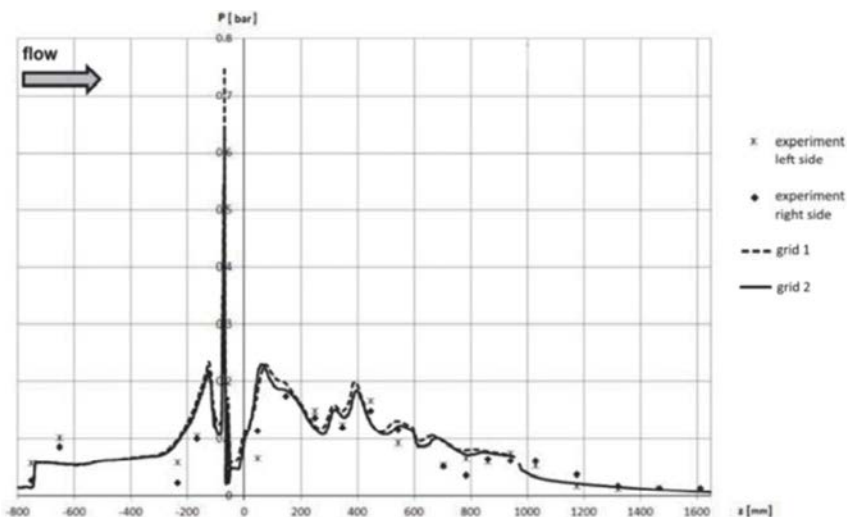


Рисунок 23 – Распределение статического давления вдоль боковой линии установки датчиков давления, бар (линия 2 на Рисунке 21)

Из рисунков видно, что совпадение расчётных и экспериментальных данных хорошее. Полученная в расчётах общая картина течения хорошо согласуется с течением, наблюдаемым в экспериментах.

Выводы

В результате расчётов, проведённых в программном комплексе (ПК) FlowVision, были получены поля скорости, давления и температуры около и внутри масштабной модели летательного аппарата HEXAFLY. Расчёты адекватно воспроизводят течение, наблюдаемое в эксперименте. Соответствие между расчётными и экспериментальными данными хорошее.

Проведенное верификационное исследование позволяет сделать вывод о том, что ПК FlowVision может быть использован для расчётов аэродинамических характеристик полномасштабной модели гиперзвукового аппарата HEXAFLY в различных условиях его эксплуатации.

Список литературы

1. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD // DCW Industries, Inc., 1994, 460 p.
2. Жуктов С. В., Аксёнов А. А. Пристеночные функции для высокореингольдсовых расчётов в программном комплексе FlowVision // Компьютерные исследования и моделирование, Том. 7, № 6, 2015, с. 1221–1239.

3. *Aksenov A. A., Zhlukov S. V., Savitskiy D. V., Bartenev G. Y., Pokhilko V. I. Simulation of 3D flows past hypersonic vehicles in FlowVision software // Journal of Physics: Conference Series, Volume 653, No. 012072, 2015, <http://iopscience.iop.org/1742-6596/Y2015>.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЯ

Михайлова М.К.¹, Фишер Ю.В.¹, Щеляев А.Е.¹
Мещеряков А.Н.²

¹ *ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия*

² *ООО «Остров – Комплект», г. Мытищи, Россия*

Объектом исследования является воздухоохладитель (ВО), состоящий из кожуха с теплообменным аппаратом (ТА) и вентилятором внутри. Теплообменный аппарат представляет собой трубчато-ребристую конструкцию. Воздух засасывается в воздухоохладитель через теплообменный аппарат, охлаждается и выходит через вентилятор наружу. Назначение воздухоохладителя – охлаждать воздух для использования в пищевой промышленности и поддержания требуемого температурного режима.

Аэродинамический (или гидродинамический) расчет воздухоохладителя является важным этапом проектирования данного типа устройств. В ходе расчета определяется значение аэродинамического сопротивления конструкции теплообменника движению газа внутри себя. Этот показатель напрямую влияет на предпочтительную скорость перемещения теплоносителя внутри устройства, а также на давление и температурные границы веществ, участвующих в теплообмене.

При моделировании потоков внутри воздухоохладителя решается задача определения расхода воздуха через охладитель при заданном теплообменном аппарате и вентиляторе. Расчет проводится в два стандартных этапа – проектировочный и поверочный. В проектировочном расчете определяется сопротивление типовой секции теплообменного аппарата для заданного диапазона скорости течения. В поверочном расчете теплообменный аппарат и вентилятор представляются как объемное анизотропное

сопротивление и объемные силы, и происходит определение рабочей точки воздухоохладителя. Воздухоохладитель представлен на Рисунке 24.

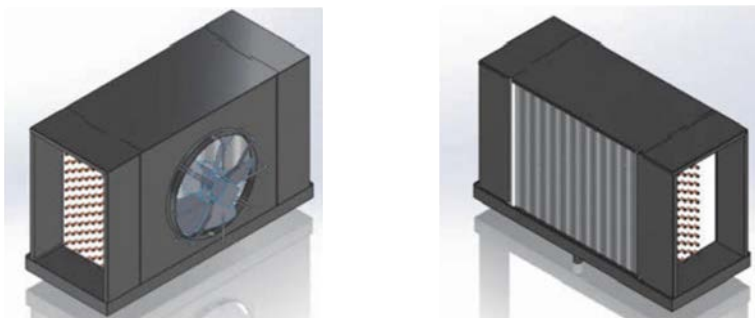


Рисунок 24 – Воздухоохладитель

Рассматриваются варианты теплообменных аппаратов с разным расстоянием между пластинами и разным числом рядов трубок. Проектные скорости в теплообменном аппарате составляют 2-5 м/с, на выходе из воздухоохладителя 12-14 м/с.

В проектировочном расчете выделяется периодический сектор ТА (см. Рисунок 25) и определяется перепад давления в нем при заданной скорости. Для этого достраиваются входной и выходной участки, и создается модель расчетной области (Рисунок 26).

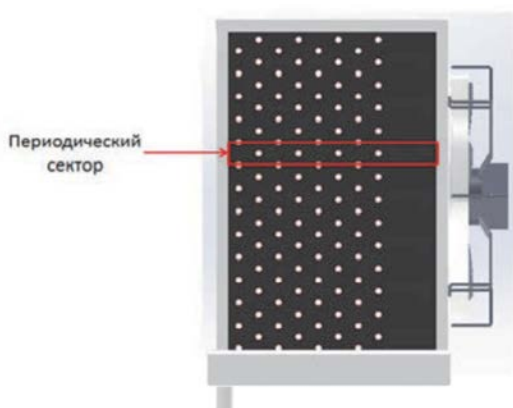


Рисунок 25 – Периодический сектор

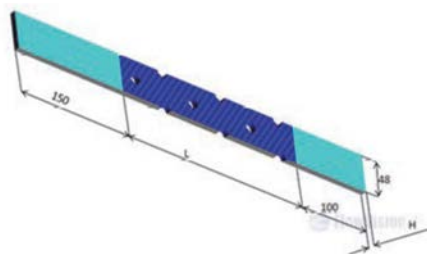


Рисунок 26 – Расчетная область для определения сопротивления

На входе задается массовый расход, соответствующий скорости, на выходе установлены атмосферные условия. Варьируется скорость от 2 до 10 м/с. Расчетная сетка получена путем последовательного измельчения начальной равномерной сетки с размером ячеек 1*1*1 мм. Разрешается поверхность трубок, поверхность пластины теплообменного аппарата и след за трубой. Минимальный размер расчетной ячейки составляет 0,06 мм. Изображение расчетной сетки приведено на Рисунке 27.

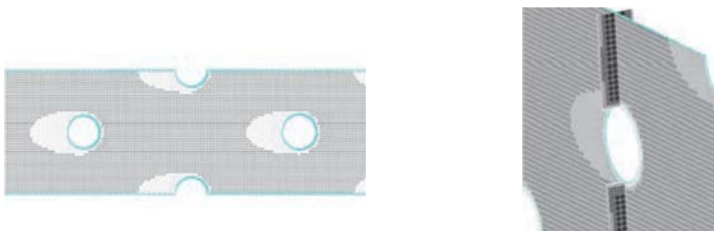


Рисунок 27 – Сечение расчетной сетки

Для оценки полученных результатов был проведен расчет ожидаемых потерь давления по справочнику Идельчика [1]. Расчет учитывает потери давления при течении в межтрубном канале без учета пластин, поэтому он может являться оценкой «снизу». Для обтекания поперечного пучка труб, расположенных в шахматном порядке коэффициент потерь определяется:

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{\rho_{\text{ср}} w_{0\text{ср}}^2}{2}} = \phi \cdot A \cdot \text{Re}_{\text{ср}}^{-0.27} (Zp + 1) + \Delta(1), \quad (1)$$

В результате расчета получены зависимости сопротивления канала от скорости потока при разных расстояниях между пластинами (см. Рису-

нок 28). Чем меньше ширина канала, тем больше сопротивление, которое в нем возникает.

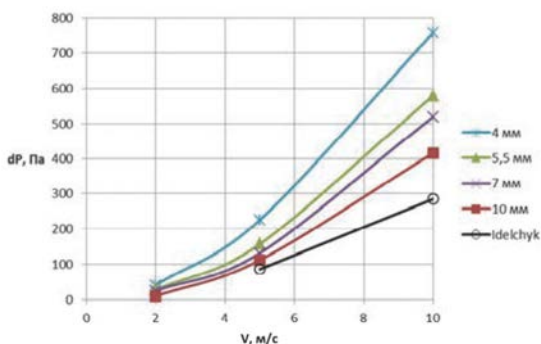


Рисунок 28 – Зависимость потери давления от скорости потока

Также в процессе исследования выявлена линейная зависимость от увеличения числа трубных рядов. На Рисунке 29 показаны зависимости сопротивления от числа рядов труб при постоянной скорости 5 м/с.

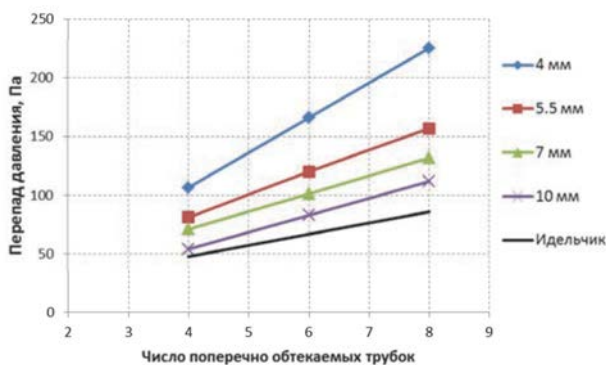
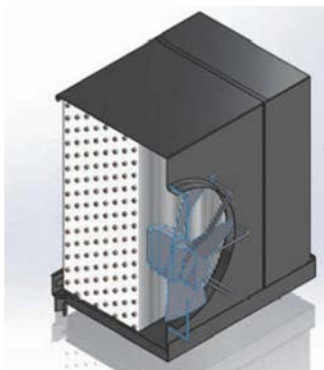


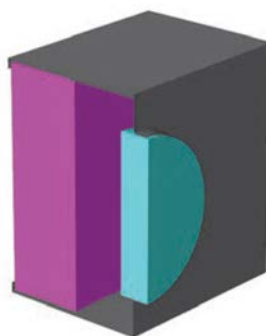
Рисунок 29 – Зависимость потерь давления при постоянной скорости от числа трубок

В поверочном расчете полученные данные из проектного расчета используются для замены сложных геометрических объектов на элементы с формульным представлением перепадов давления – модификаторы [2].

Модификаторы не требуют тщательного разрешения расчетной сеткой всех особенностей геометрии конструкции теплообменника и вентилятора за счет отказа от образующих их форм и заменой его простым объектом с формулой. В составе воздухоохладителя теплообменный аппарат заменяется модификатором сопротивления, вентилятор – модификатором объемной силы. Замена реальных объектов на модификаторы представлена на Рисунке 30.



Воздухоохладитель



Кожух с модификаторами

Рисунок 30 – Замена реальных объектов модификаторами

Принято допущение о симметричности течения, рассматривается сектор 90° , расчетная область представлена на Рисунке 31.

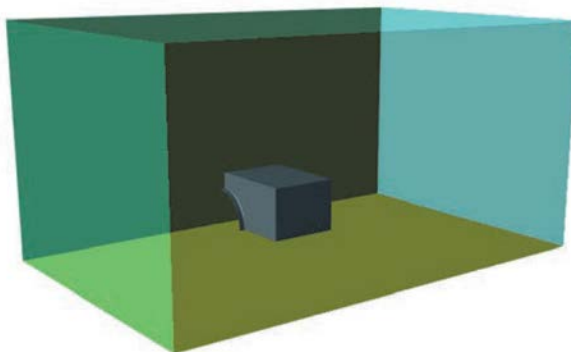


Рисунок 31 – Расчетная область

На плоскостях симметрии поставлено граничное условие «Симметрия», остальные внешние граничные условия – атмосферные. Кожух является стенкой. После установки граничных условий задаются модификаторы.

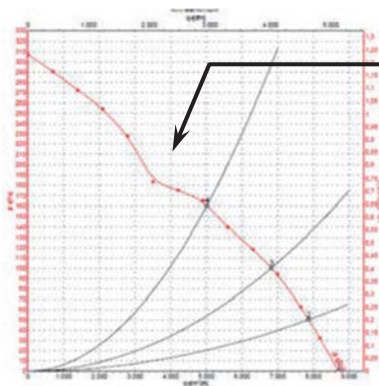
Для замены теплообменного аппарата задается параллелепипед с габаритными размерами теплообменного аппарата. В параллелепипеде устанавливается модификатор анизотропного сопротивления, представляющий собой диагональную матрицу

Коэффициенты анизотропного сопротивления определяются как отношение перепада давления на участке при заданной скорости к произведению скорости потока и длины участка.

$$D_{11} = \frac{\Delta p}{l \cdot v} \quad (2)$$

Все величины для определения коэффициентов получены из проектного расчета. Коэффициент в направлении поперек пластин задается очень большим – 100 000 кг/м³*с для предотвращения боковых вторичных течений.

Вентилятор заменяется модификатором объемной силы, установленным в цилиндре. В качестве входных данных дана характеристика вентилятора (см. Рисунок 32) и его размеры – рабочая длина и диаметр лопастей.



Напорная ветка

Рисунок 32 – Напорная ветка вентилятора

С помощью напорной ветки вентилятора формируется таблица зависимости перепадов давления от расхода. Из расхода определяется средняя скорость потока в сечении вентилятора. Силу, которую создает вентилятор, можно определить, как произведение перепада давления в вентиляторе и площади поперечного сечения вентилятора. Объемная сила определя-

ется как сила с единицы объема или как отношение перепада давления к длине вентилятора:

$$F_{\text{vol}} = \frac{\Delta p \cdot s}{s \cdot h} = \frac{\Delta p}{h} \quad (3)$$

В модификаторе устанавливается зависимость объемной силы от скорости (см. Рисунок 33).

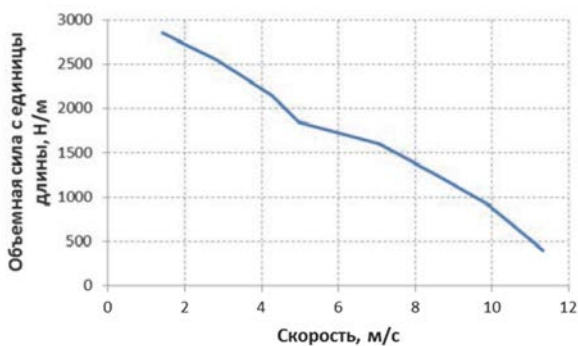


Рисунок 33 – Объемная сила

Ожидаемые результаты получаются при наложении напорной ветки вентилятора и характеристики сопротивления теплообменного аппарата (типоразмер E55).

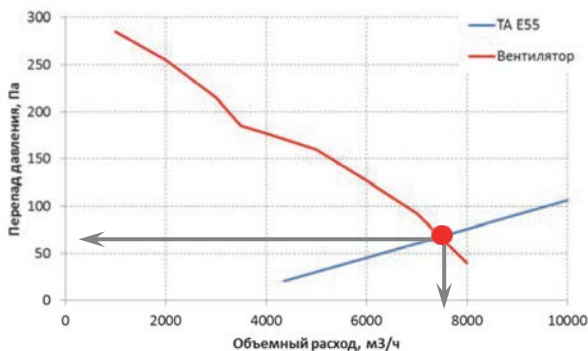


Рисунок 34 – Определение рабочей точки

По результатам расчетов получаем распределение давления в воздухоохладителе. На графиках (см. Рисунок 35) приведено распределение давления вдоль воздухоохладителя. Приведены кривые распределения среднего давления по сечениям и давления вдоль центральной оси. На Рисунке 36 приведены цветовые контуры распределения давления в центральном сечении воздухоохладителя.



Рисунок 35 - Распределение среднего давления по длине и давления вдоль центральной оси воздухоохладителя

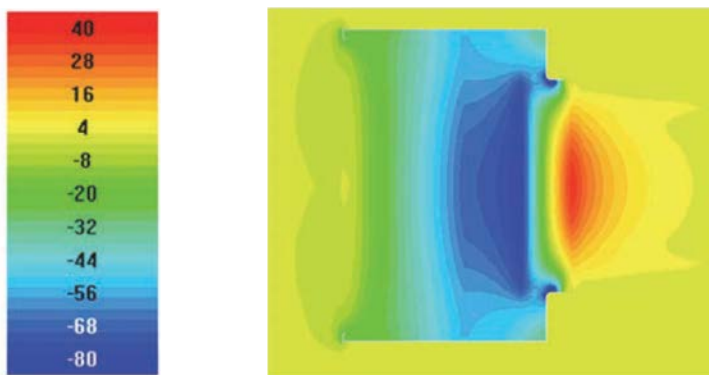


Рисунок 36 - Распределение избыточного давления в плоскости симметрии воздухоохладителя, Па

В результате расчета получена рабочая точка. Проводится сравнение результатов расчета с ожидаемыми результатами. На график на Рисунке 37 нанесены рабочая ветка вентилятора, сопротивление теплообменного аппарата, сопротивление теплообменного аппарата вместе с сопротивлением корпуса, а также данные расчета в программном комплексе проектирования ребристых теплообменников Unilab Coils итальянской компании Unilab.

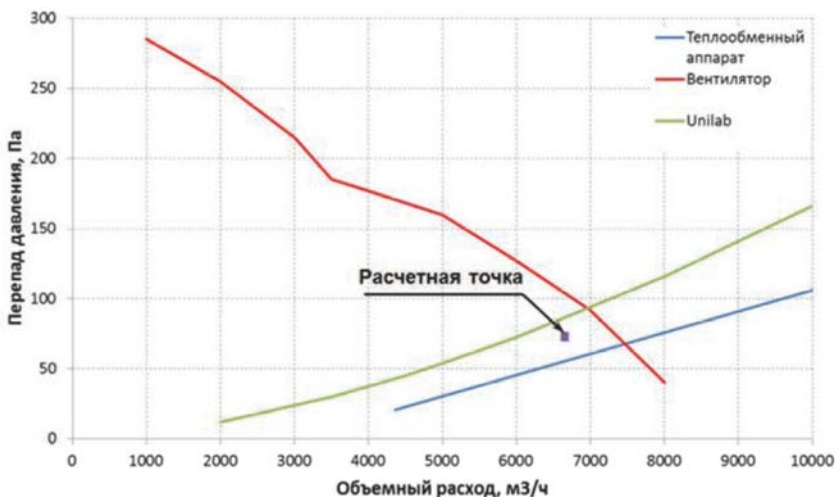


Рисунок 37 – Результаты проектирования и моделирования

Ожидаемые результаты согласно проектному расчету FlowVision и Unilab различаются по расходу на 7%. Результирующая точка, полученная в результате поверочного расчета, не попала ни на одну из характеристик. Возможная причина – неравномерность потока на входе в воздухоохладитель, обусловленная его формой.

В результате проведения проектного и поверочного расчета получены ожидаемые и расчетные значения рабочих точек воздухоохладителя. В результате моделирования сформулирована проблема интерпретации сопротивления теплообменного аппарата и напора вентилятора для разработки инженерной методики поиска расчетной точки воздухоохладителя.

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛА «ПОДВИЖНОЕ ТЕЛО» В FLOWVISION

Михайлова М.К., Щеляев А.Е.

ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

В мировой практике существует большой класс задач, в которых необходимо моделировать поведение движущихся объектов в среде и реакцию среды на них. Например, в спорте движение спортсмена и его оптимальное положение в пространстве. В ракетной технике – приводнение возвращаемого аппарата. В турбомашиностроении – движение роторов при неподвижном статоре. Причем, если одни типы движения, такие как вращения лопаток турбомашин, можно смоделировать в CFD кодах, вращая расчетные подобласти, друг относительно друга и связывая их по скользящим граничным условиям, то другие типы подразумевают под собой прямое моделирование движения объектов в расчетной области.

В статье рассмотрены возможности задания движения подвижных тел в программном комплексе FlowVision.

Подвижное тело – это объект, представляющий собой замкнутую поверхность, который влияет на течение среды в процессе расчета [1]. В процессе расчета подвижные тела могут изменять свое положение и двигаться с заданной явным образом скоростью или под действием сил и моментов. На них могут быть установлены разные граничные условия.

Уравнение движения тела.

Скорость тела, как материальной точки, описывается уравнением (1)

$$\mathbf{V} = \left(\mathbf{V}_{user} + \frac{(\mathbf{F}_{user} + \mathbf{F}_{hydr}) \cdot dt}{m} \right) \cdot \mathbf{O}_v, \quad (1)$$

где $\mathbf{V}_{user}$ – вектор скорости в абсолютной системе координат, задаваемый пользователем;

$\mathbf{F}_{user}$ – внешняя сила в абсолютной системе координат, действующая на тело;

$\mathbf{F}_{hydr}$ – гидродинамическая сила (сила воздействия окружающей среды);

dt – шаг интегрирования;

m – масса тела;

$\mathbf{O}_v$ – демпфирующий коэффициент.

Все векторные величины задаются как проекции на оси абсолютной системы координат. При задании только скоростей масса тела может быть нулевой, при задании сил, действующих на тело, обязательно задавать массу тела. Если задача рассчитывается в симметричной (половинной) постановке, то масса и внешняя сила должны задаваться только для активной части подвижного тела, омываемой потоком и находящейся в расчетной области.

Угловая скорость вращения тела вокруг центра вращения описывается уравнением (2)

$$\dot{\omega} = O_{\omega} \cdot (\omega_{user} + J^{-1} \cdot (T_{user} + T_{hydr}) \cdot dt), \quad (2)$$

где O_{ω} – демпфирующий коэффициент вращения;

ω_{user} – угловая скорость в абсолютной системе координат, заданная пользователем;

J^{-1} – матрица моментов инерции в системе координат подвижного тела;

T_{user} – момент сил в абсолютной системе координат, заданный пользователем;

T_{hydr} – гидродинамический момент со стороны окружающей среды.

При движении тела рассматриваются три этапа движения:

- тело покоится;
- тело движется под заданными линейными и угловыми скоростями;
- тело движется под действием внешних и гидродинамических сил и моментов.

Для всех этапов движения можно установить свои отрезки времени активности тела, которые могут пересекаться между собой, задавая комплексный тип движения.

Реализация технологии подвижных тел такова, что обтекаемые тела не взаимодействуют между собой напрямую и с границами расчетной области. Для корректного расчета движение подвижного тела может задавать действующие степени свободы. Для тела может быть использован один из двух вариантов задания степеней свободы: шесть степеней свободы (три вращательных и три поступательных) или две степени свободы (одна поступательная и одна вращательная, относительно одной оси). Также движение тела может быть ограничено внешними геометрическими объектами – плоскостью, которую тело не может пересечь, или объектом, ограни-

чивающим движение точки, заданной в системе координат подвижного тела.

Подвижным телом может быть геометрический объект, созданный во внешних системах геометрического моделирования и импортированный в FlowVision или же это геометрический объект, задаваемый собственными средствами FlowVision. К объекту применяются те же ограничения, что действуют для основной геометрии подобласти. Модель должна представлять собой замкнутую поверхность или набор замкнутых поверхностей, не имеющих общих точек. Также поверхности не должны иметь самопересечений. Недопустимо совпадение поверхности подвижного тела с поверхностью другого подвижного тела или основной геометрии, только пересечение или зазор.

Движение тела относительно расчетной сетки сопровождается автоматическим перестроением пристеночных ячеек, пересекаемых гранями подвижного тела, в ходе расчета. Ячейки, попавшие внутрь расчетного тела, являются нерасчетными, для них отсутствует расчетная модель физических процессов. При движении подвижного тела на каждом шаге рассчитывается новое положение подвижного тела и параметров его движения (скорости, силы, моменты) и перестраивается пристеночная расчетная сетка. Для исключения погрешностей счета, вызванных движением тела, настоятельно рекомендуется организовать процесс моделирования таким образом, чтобы за один шаг интегрирования подвижное тело перемещалось не более чем на одну ячейку. Для этого шаг по времени ограничивается с помощью поверхностного числа $CLF = 1$.

В FlowVision существует возможность решать задачи с деформируемыми в процессе расчета телами. Деформация может быть вызвана как воздействием гидродинамических сил, так и произвольным законом изменением геометрической модели, задаваемым явным образом. Для решения задачи о взаимодействии жидкости и деформируемой конструкции используются пакеты вычислительной прочности, основанные на методе конечного элемента. При этом в гидродинамическом расчете определяются распределение давления и температуры на омываемой поверхности подвижного тела, а прочностной пакет, используя эти данные, определяет напряженно-деформированное состояние объекта, определяет деформации формы тела и передает измененные координаты узлов поверхностной сет-

ки обратно в FlowVision. Далее происходит гидродинамический расчет с обновленной формой тела и повторение цикла расчета взаимодействия жидкости и конструкции.

Для прямого задания закона изменения формы тела используются внешние средства геометрического моделирования, которые обладают инструментарием для изменения формы тела произвольными методами. Например, для моделирования задач биомеханики человека используется технология покадровой съемки движения, и затем эти модели, предварительно сохраненные в покадровом измененном виде, импортируются в FlowVision (см. Рисунок 38).



Рисунок 38 – Покадровая съемка движения спортсмена

ВЛИЯНИЕ СЕТОЧНОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION

Евграфова А.В., Попова Е.Н., Сухановский А.Н.
УрО РАН, г. Пермь, Россия

Основными причинами развития крупномасштабных течений в атмосфере и океане являются вращение Земли и массовые силы, обусловлен-

ные наличием горизонтального градиента температуры. Конвективная природа атмосферных течений определяет большой интерес к лабораторному и численному исследованию конвективных задач во вращающихся слоях жидкости. Как известно крупномасштабные атмосферные вихри, такие как тропические циклоны (ураганы, тайфуны), представляют большую угрозу для мореходства и наносят колоссальный ущерб при выходе на сушу. Необходимость прогноза формирования и движения тропических циклонов привела к появлению нового направления в геофизической гидродинамике связанного с исследованием тропического циклогенеза. Среди методов исследования и прогнозирования атмосферных вихрей одним из основных является численное моделирование с использованием различных атмосферных моделей. Развитие этих моделей было обусловлено стремлением максимально подробно описать реальные атмосферные условия. Однако большое количество факторов, непосредственно влияющих на формирование тропических циклонов, делает чрезвычайно сложным выделение основных параметров и механизмов, определяющих генезис вихревых структур. Это привело к тому, что в настоящее время происходит некий возврат к использованию упрощенных математических моделей. Так в работе (Kilroy, Smith, 2015) использовалась осесимметричная, трехуровневая (по высоте) модель. Наряду с математическими моделями снова растет значимость лабораторного моделирования геофизических систем. Преимуществом лабораторных экспериментов является то, что они позволяют исследовать реальную физическую систему, пусть и на значительно меньшем масштабе, с небольшим числом контролируемых управляющих параметров. Это позволяет изучить роль самых значимых из них в процессах возбуждения и эволюции вихревых течений. Формирование крупномасштабного вихря над нагретым диском в слое вращающейся жидкости наблюдалось в [Brickman, Kelley, 1993; Brickman 1995]. Однако основной упор в этих работах был сделан на возникновении системы вихрей, их размерах и количестве в зависимости от параметров задачи. Эксперименты, во многом аналогичные [Brickman, Kelley, 1993; Brickman 1995] были проведены в [Boubnov, van Heijst, 1994]. Авторы приводят качественное описание циклонического вихря, зависимости его интенсивности и формы от скорости вращения и размера нагревателя. В экспериментах [Богатырев,

1990, Богатырев, Смородин, 1996] рассматривался плоский вращающийся слой жидкости, подогреваемый снизу в центральной области дна. Локализованный нагрев приводит к появлению крупномасштабного течения в виде тороидальной конвективной ячейки. В пограничном температурном слое в области нагрева формируются мелкомасштабные вторичные течения, подобные тем, что подробно описаны в [Sukhanovsky et al, 2012; Sukhanovskii et al 2016, Physica D]. Сила Кориолиса, действуя на конвергентный поток в нижней части слоя, приводит к закручиванию жидкости по направлению вращения кюветы, то есть циклоническому движению. Напротив, поток, который направлен от центра к периферии, закручивается антициклонически. Авторы [Богатырев, 1990, Богатырев, Смородин, 1996] предположили, что при превышении критического значения числа Грассгофа, баланс между циклоном и антициклоном нарушается, что приводит к преобладанию циклонического движения в центре и антициклонического на периферии. Также было показано, что интенсивность и структура вихря зависят от различных факторов, в том числе от аспектного соотношения и физических параметров рабочей жидкости. Детальное исследование структуры, и характеристик азимутального, и радиального течений, в зависимости от основных управляющих параметров, таких как нагрев, вращение и вязкость при помощи полевых методов измерений представлено в [Sukhanovskii et al 2016, Quart. J.R.Met.Soc.]. Надо отметить, что даже использование современных измерительных систем не позволяет получить полную информацию о распределениях скорости и температуры в объеме жидкости. Поэтому проведение расчетов при помощи CFD пакетов представляется чрезвычайно важным. Представленная система является сложным объектом для численного исследования, так как она характеризуется формированием течений различных масштабов, наличием дифференциального вращения. Потоки тепла и момента импульса существенно зависят от процессов, протекающих в пограничных слоях. В связи с этим важно найти оптимальное разрешение сетки, которое позволит корректно описать формирование мелкомасштабных вторичных течений в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. В данной работе представлены результаты расчетов на сетках с различным шагом и их сравнение с экспериментальными данными.

Особенности численной реализации в программном комплексе FlowVision

Для проведения численных расчетов использовался коммерческий программный продукт FlowVision 3.09.02. В работе исследовалось формирование крупномасштабного течения во вращающемся цилиндрическом слое жидкости с твердыми боковыми стенками и дном, свободной верхней границей и локализованным нагревом в центре дна.

Расчетная модель представляла собой цилиндрическую полость радиусом 15 см и осью вращения, совпадающей с осью z цилиндрической системы координат, имеющей начало в центре дна модели (Рисунок 39). Область нагрева представляла собой круг, расположенный в центре дна, радиусом 5 см. В качестве рабочей жидкости было использовано силиконовое масло ПМС-5. Вязкость масла задавалась на основе экспериментальных измерений, остальные характеристики брались из таблиц. Толщина цилиндрического слоя составляла 3 см. Параметры расчета выбирались приближенными к параметрам экспериментов. Геометрические размеры расчетной области совпадают с размерами экспериментальной установки. Подробное описание экспериментальной установки можно найти в (Sukhanovskii et al 2016, Physica D, Quart. J.R.Met.Soc.).

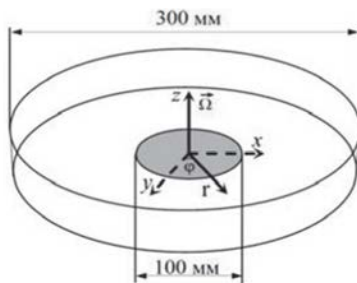


Рисунок 39 – Геометрия расчетной модели и расположение системы координат

Рассматривалось ламинарное течение. Для реализации тепловой конвекции в приближении Буссинеска в качестве пользовательской силы задавалась массовая сила, обусловленная объемным расширением жидкости вследствие изменения температуры – $S_{user} = \rho_{hyd} \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T$. Здесь β – коэффициент объемного расширения, ΔT – разница температур относительно

начальной. Физические свойства жидкости (ρ , λ , μ , β , C_p) полагались независимыми относительно температуры и задавались постоянными.

В качестве граничного шаблона для всех границ расчетной области, кроме верхней грани был использован шаблон «Стенка». На боковых стенках и дне ставилось условие прилипания для скорости и адиабатичности для температуры. В области нагрева был задан постоянный поток тепла. На верхней грани задавалось граничное условие - симметрия, с проскальзыванием для скорости.

Для организации оттока тепла на верхней границе в ячейках, прилегающих к ней, задавался объемный поток тепла (отрицательный), интегральное значение потока тепла через границы было равно нулю. Расчетная модель располагалась во вращающейся системе координат. Ось вращения совпадала с вертикальной осью z , угловая скорость вращения была равна $\Omega = 0,087$ рад/с. Мощность нагрева составляла 17 Вт. Начальная температура жидкости задавалась равной 298 К. Начальная скорость была равна скорости твердотельного вращения. Начальные и граничные условия, а также характеристики жидкости выбирались максимально приближенными к эксперименту для того, чтобы провести верификацию численной модели.

Расчеты проводились на трех сетках с фиксированным шагом. Шаг сетки был равен 2 мм, 1 мм и 0.5 мм. Пример расчетной сетки приведен на Рисунке 40. На рисунке показана сетка вблизи границы цилиндрической области. Шаг по времени был фиксированным и равным 0.1 с. Для сеток с шагом 1 мм и 2 мм проводились также тестовые расчеты с шагом 0.05 с, которые не выявили зависимости от величины временного шага.

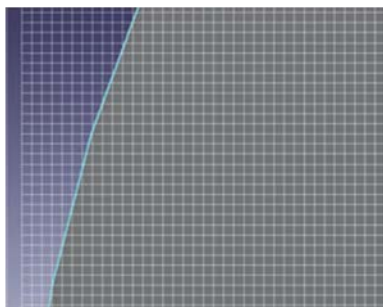


Рисунок 40 – Пример расчетной сетки вблизи границы области

Для сравнения численных результатов и эксперимента были вычислены безразмерные параметры, характеризующие данную задачу: потоковое число Грасгофа Gr_f , безразмерная скорость вращения Re , число Экмана E , число Прандтля Pr . В Таблице 1 приведены значения безразмерных величин для эксперимента и численной реализации.

$$Gr_f = \frac{g\beta h^4 P}{C\rho\chi\nu^2 S}; \quad Re = \frac{\Omega h^2}{\nu}; \quad E = \frac{\nu}{\Omega h^2}; \quad Pr = \frac{\nu}{\chi},$$

где g – модуль вектора гравитационного ускорения, β – коэффициент теплового расширения, h – толщина слоя жидкости, P – мощность нагрева, C – теплоемкость, ρ – плотность, χ – температуропроводность, ν – кинематическая вязкость, S – площадь нагревателя, Ω – угловая скорость вращения.

Таблица 1

	$Gr_f \cdot 10^6$	Re	E	Pr
FlowVision	4.6	29	0.035	61
Эксперимент	4.5	27	0.036	60

Результаты численных расчетов

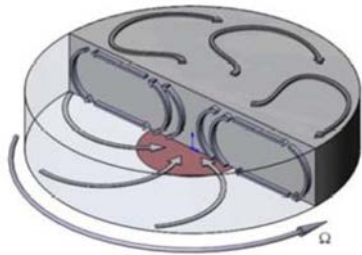


Рисунок 41 – Структура крупномасштабного течения

Экспериментально структура основного течения в данной системе исследовалась ранее [Sukhanovskii et al 2016, Quart. J.R.Met.Soc.] и схематично показана на Рисунке 41. Локализованный нагрев на дне приводит к формированию крупномасштабного конвективного течения с конвергентным потоком в нижней части слоя и дивергентным в верхней. Интенсивная радиальная циркуляция приводит к обмену угловым моментом между центром и периферией. Конвергентное течение в нижней части слоя переносит элементы жидкости, обладающие большим угловым моментом в

центр, формируя там циклоническое движение. Дивергентное течение, напротив, уносит жидкость с малых радиусов на большие, формируя антициклоническое движение. На Рисунке 42 а, в представлены поля азимутальной V_ϕ и радиальной V_r компоненты скорости для шага расчетной сетки 1 мм, осредненные по азимутальной координате и времени. На Рисунке 42 б, г представлены результаты эксперимента. Белая линия показывает границу между конвергентным и дивергентным (а, б) или циклоническим и антициклоническим (в, г) течениями.

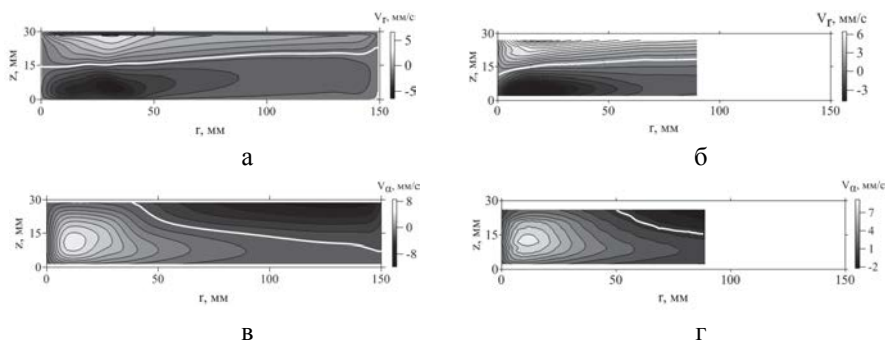


Рисунок 42 – Поля радиальной (а, б) и азимутальной (в, г) компоненты скорости, осредненные по времени и пространству: а, в – результаты численного счета FlowVision, б, г – результаты эксперимента

На полях азимутальной скорости можно видеть, что в центральной части слоя существует интенсивный циклонический вихрь, на характеристики которого в значительной степени влияют вязкость и скорость вращения [Sukhanovskii et al 2016, Quart. J.R.Met.Soc.]. Среднее поле радиальной скорости характеризуется двумя ярко выраженными экстремумами. При движении жидкости к центру кюветы жидкость прогревается за счет взаимодействия с теплообменником, становится легче и всплывает, образуя интенсивную подъемную струю. Нагретая жидкость, охлаждаясь на свободной поверхности, продолжает свое движения по направлению к периферии, где она опускается вдоль боковых стенок. Интенсивность подъемной струи обусловлена мощностью нагрева, а размеры струи влияют на положение экстремумов конвергентного и дивергентного течений.

На Рисунке 43 а приведен профиль радиальной скорости вдоль вертикальной координаты для значения радиуса $r = 15$ мм. Выбор координаты обусловлен положением максимума радиальной скорости на экспериментальном распределении (Рисунок 42 б). На Рисунке 43 б представлено распределение азимутальной скорости вдоль радиальной координаты в середине слоя. Надо отметить, что средние профили, полученные в результате численных расчетов, имеют хорошее качественное и количественное согласие с экспериментальными данными.

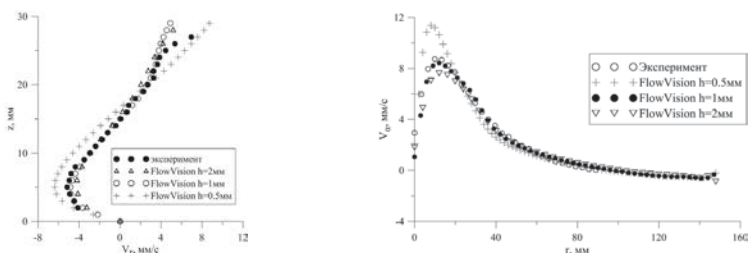


Рисунок 43 – а – профиль средней радиальной скорости вдоль вертикальной координаты $r = 15$ мм, б – профиль средней азимутальной скорости вдоль радиальной координаты $z = 15$ мм

На Рисунке 43 представлены профили радиальной и азимутальной скорости вдоль радиальной координаты, осредненные по времени и пространству. Профили соответствуют различным значениям координаты z (3, 15 и 27 мм от нагревателя) и дают представление о структуре течения на всех высотах слоя.

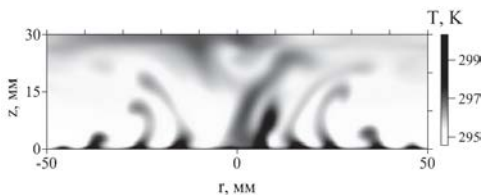


Рисунок 44 – Конвективные плюмы

Радиальная скорость вблизи дна оказывается меньше, нежели возле верхней границы. Очевидно, это обусловлено наличием свободной границы и условием проскальзывания для всех компонент скорости. В середине слоя радиальная скорость меняет знак, то есть конвергентное течение сме-

няется дивергентным. Максимум циклонического движения приходится на середину слоя, при приближении к верхней границы интенсивность уменьшается. Антициклоническое движение происходит за пределами нагревателя. В целом можно отметить, что расчетные данные хорошо согласуются с экспериментом и адекватно описывают динамику основного течения.

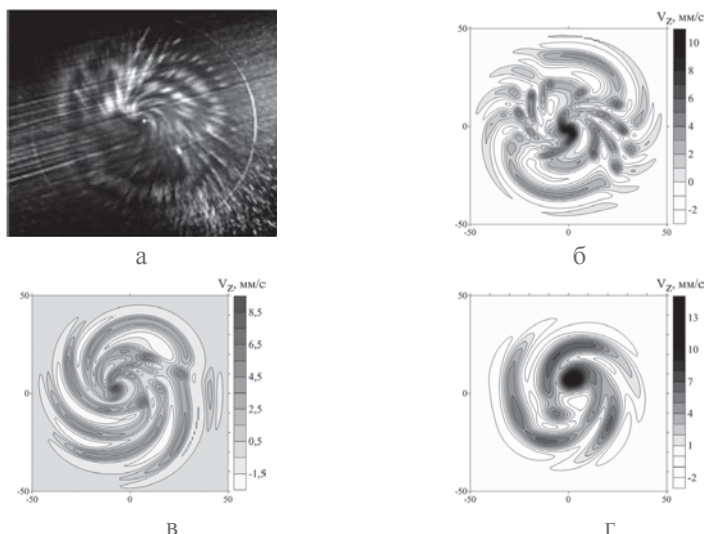


Рисунок 45 – а – эксперимент, визуализация течения с помощью алюминиевой пудры на высоте $z = 5$ мм, поля вертикальной скорости в области нагревателя на высоте $z = 5$ мм: б – Flow Vision $h = 0.5$ мм, в – Flow Vision $h = 1$ мм, г – Flow Vision $h = 2$ мм.

При натекании конвергентного потока на нагреватель вблизи его поверхности возникает пограничный слой с неустойчивой стратификацией температуры. В этом пограничном слое возникают вторичные структуры в виде конвективных валов различной ориентации. Вторичные движения существенно изменяют распределение температуры в пограничном слое и приводят к возникновению в зоне нагрева системы конвективных плюмов, которые сносятся к центру основным, крупномасштабным течением (Рисунок 44). Изучению формы вторичных течений и их динамики в неподвижном цилиндрическом слое жидкости при наличии локализованного

нагрева посвящены работы [Евграфова и др., 2013; Sukhanovskii et al 2016, Physica D].

На Рисунке 45 а представлена визуализация течения с помощью алюминиевой пудры в сечении XOZ над нагревателем на высоте $z = 5$ мм. Алюминиевые чешуйки, двигаясь вместе со средой, выстраиваются вдоль потока. Если на пути чешуйки возникает неоднородность скорости, она изменяет свою ориентацию относительно потока. При просвечивании слоя жидкости в направлении основного движения можно зафиксировать изменение ориентации алюминиевых чешуек, они будут отражать свет и на выходе можно получить картину с системой светящихся точек, расположенных на границах конвективных валов. На представленной визуализации видно, что течение имеет сложную структуру. На периферии нагревателя существует ряд радиально ориентированных валов, которые на визуализации представлены системой светлых полос. Они образованы скоплениями пудры между соседними вращающимися конвективными валами. Одновременно с радиальными валами в системе возникают конвективные валы, поперечные основному потоку. Вследствие обмена угловым моментом с конвергентным потоком валы закручиваются в спираль. На Рисунке 45 (б, в, г) представлены мгновенные поля вертикальной скорости над областью нагрева на высоте $z = 5$ мм для сеточных разрешений 0.5мм, 1мм и 2мм соответственно. Результаты численных расчетов обнаруживают общую тенденцию к натеканию жидкости в определенном направлении, что подтверждается экспериментальными наблюдениями.

Распределения вертикальной скорости, представленные на Рисунке 44, соответствуют квазистационарному режиму. Квазистационарный режим характеризуется малой вариацией интегральных характеристик течения. На Рисунке 46 приведены зависимости средней по области нагревателя кинетической энергии и температуры от времени. Время выхода на квазистационарный режим при различных сеточных разрешениях совпадает. Величина средних значений при увеличении шага сетки уменьшается.

В качестве основного вывода отметить хорошее согласие результатов численных расчетов с экспериментом. Общая структура крупномасштабного течения достаточно хорошо описывается даже на относительно грубой сетке. Изучение мелкомасштабных структур в пограничном слое требует существенного измельчения шага сетки.

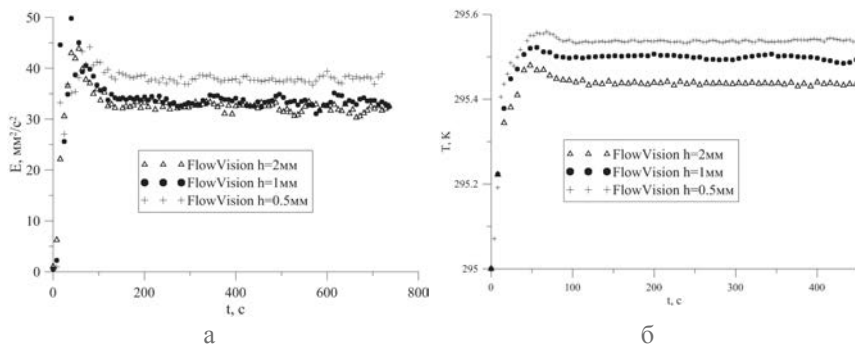


Рисунок 46 – а – Средняя по области нагрева кинетическая энергия, б – средняя по области нагрева температура

Список литературы

1. *Богатырев Г.П.* Возбуждение циклонического вихря или лабораторная модель тропического циклона // Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 51, № 11. – С. 557-559.
2. *Богатырев Г.П., Смородин Б.Л.* Физическая модель вращения тропического циклона // Письма в ЖЭТФ. – 1996. – Т. 63, № 1. – С. 25-28.
3. *Евграфова А. В., Левина Г. В., Сухановский А. Н.* Исследование распределения завихренности и спиральности при взаимодействии адвективного потока с вторичными структурами // Вычислительная механика сплошных сред. 2013, том.6, №4, стр. 451-459.
4. *Brickman, D. and Kelley, D.* Development of convection in a rotating fluid: scales and pattern of motion // J. Atmos. Sci., 19: 389–405, 1993.
5. *Brickman, D.* Heat flux partitioning in open-ocean convection // J. Phys. Oceanogr., 25: 2609–2623, 1995.
6. *Boubnov, B.M. and van Heijst, G.J.F.* Experiments on convection from a horizontal plate with and without background rotation // Exp. Fluids, 16: 155–164, 1994.
7. *Kilroy G, Smith R. K.* Tropical cyclone convection: the effects of a vortex boundary layer wind profile on deep convection // Quart. J.R.Met.Soc., 141,714-726. 2015.
8. *Sukhanovsky A., Batalov V., Teymurazov A., and Frick P.* Horizontal rolls in convective flow above a partially heated surface // The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems, Volume 85, Number 1 (2012), pp. 1-12. DOI:10.1140/epjb/e2011-20420-7.

9. Sukhanovskii A. and Evgrafova A. and Popova E. Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer // Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol.316, 2016, Pages23–33.

10. Sukhanovskii A. and Evgrafova A. and Popova E. Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // Quart. J.R.Met.Soc., 2016, doi: 10.1002/qj.2823.

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХЗВУКОВЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Фишер Ю.В., Щеляев А.Е.

ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

В работе рассматриваются тестовые случаи для верификации CFD-кодов: эксперименты Сейнера для расчетного и нерасчетного истечения из сопла при числе Маха на срезе $M_a=2$ для «холодных» и «горячих» струй [1], а также один из экспериментов по распространению струи в сверхзвуковом спутном потоке $M=2,2$, $M_a=2,02$ [2]. Данные по проведению всех экспериментов имеются в открытом доступе, в том числе в базе NPARC[3]. Каждый из представленных тестов служит основой для построения корректной математической модели процесса распространения турбулентной струи. Простота геометрии объектов и прозрачность граничных условий моделей турбулентных струй позволяют избежать методических ошибок. При этом процесс распространения струи включает взаимодействие сложных физических процессов, требующих наиболее точного моделирования (турбулентность и расчет скачков уплотнения в газе), поэтому сверхзвуковые турбулентные струи являются хорошим тестом для верификации CFD-кодов.

Тесты Сейнера

Описание задачи. Рассматривается истечение воздуха из осесимметричного сверхзвукового сопла. Математическое моделирование проводится для двух вариантов истечения из сопла: расчетного истечения (изобарическая струя) и нерасчетного (недорасширение) при $n = 1,47$. Степень нерасчетности определяется как отношение статического давления на срезе сопла к давлению окружающей среды:

$$n = \frac{p_a}{p_0} \quad (1)$$

Число Маха на срезе сопла в каждом варианте составляет $M_a = 2$; температура на срезе варьируется: рассматриваются и «холодные», и «горячие» струи.

При проведении верификационных расчетов требуется определить характеристики струи вдоль оси сопла на расстоянии до $X/R_a = 80$.

Постановка задачи. Расчет проводится от среза сопла, диаметр выходного сечения 80 мм. Геометрическая постановка – двумерная секторная (угол 4°). Размеры расчетной области представлены на Рисунке 47.

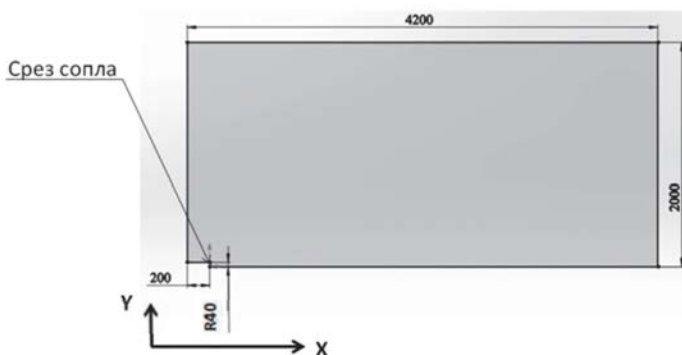


Рисунок 47 – Геометрические характеристики расчетной области

Моделируются следующие физические процессы:

- Теплоперенос;
- Движение;
- Турбулентность [4].

Для идентификации математической модели для расчетов струй исследуется несколько моделей турбулентности:

- Модель k-ε и ее модификации:
 - KES – стандартная;
 - KES – с поправкой на сжимаемость;
 - KEFV;
- Модель SST

Модели турбулентности FlowVision имеют крайне необходимую для точного расчета сверхзвуковых течений поправку на сжимаемость. Учет

сжимаемости проводится с помощью установки коэффициентов, которые «включают» в расчет дополнительные члены в уравнении для турбулентной энергии k . Константы можно менять в интерфейсе программы, применив:

– модель Wilcox (по умолчанию):

$$M_{t0}=0,25; \zeta=1,5;$$

– модель Sarkar:

$$M_{t0}=0; \zeta=1,0;$$

а также можно отключить учет сжимаемости. Стоит отметить, что по умолчанию модель KES имеет набор констант, соответствующий модели учета сжимаемости по Wilcox [5].

Начальные условия предполагают, что газ из сопла вытекает в пространство с атмосферным давлением $p_0 = 101000\text{Па}$ и температурой $T_0 = 300\text{ К}$. Граничные условия задаются для каждого расчетного случая (см. Таблицу 1). На входе газа в расчетную область (срез сопла) задаются постоянные величины, параметры турбулентности на границе и в свободном пространстве определены по рекомендациям, приведенным в статье [6]. Расстановка граничных условий показана на Рисунке 48.

Таблица 1

Исходные данные. Тесты Сейнера

Тестовый случай	$n_a = P/P_0$	$T_a, \text{ К}$	M_a
Расчетное истечение	1	755; 3000	2
Недорасширение	1,47	300	2

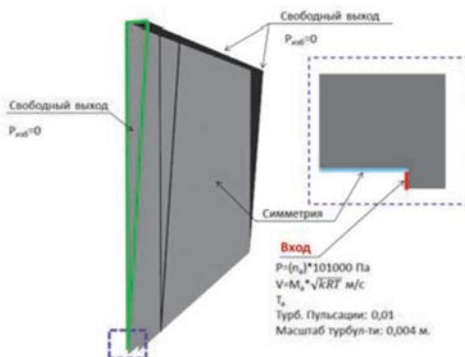


Рисунок 48 – Граничные условия

Расчетная сетка

Задается неравномерная начальная сетка со сгущением вблизи среза сопла. Проводилось исследование сходимости по сетке, при котором характеристики на оси сопла сравниваются на 3-х вариантах сетки. Итоговая расчетная сетка показана на Рисунок 49. Локальная адаптация (сгущение) сетки осуществляется в области формирования струи. Минимальный размер ячейки составляет 1 мм (40 ячеек по радиусу) для расчетного истечения и 80 ячеек – для недорасширенной струи, так как для разрешения скачков уплотнения в струе необходима более подробная сетка. Общее количество расчетных ячеек составляет 250-400 тыс. в зависимости от расчетного случая.

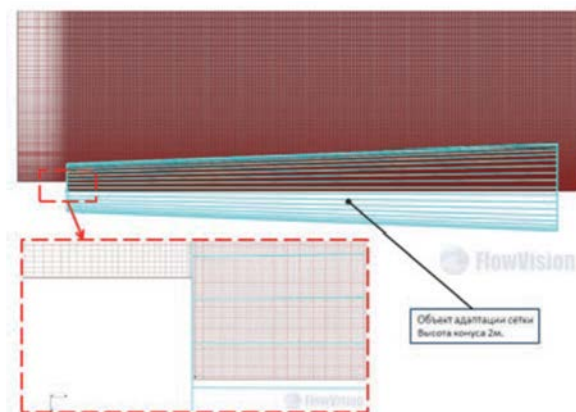


Рисунок 49 – Расчетная сетка

Результаты расчетов

Полученные результаты расчета сравнивались с экспериментальными данными и данными, полученными в других расчетных кодах по характеристикам вдоль оси сопла. Результаты расчета для адиабатной струи ($n = 1$) представлены на Рисунках 50-53. График, представленный на Рисунке 50, показывает изменение скорости вдоль оси сопла в безразмерном виде:

$$\frac{V}{V_{\max}} = f\left(\frac{x}{R_a}\right), \quad (2)$$

где $V_{\max}$ – скорость в выходном сечении сопла, м/с, определяемая по числу Маха:

$$V_{\max} = M_a \cdot \sqrt{kRT_a}, \quad (3)$$

Для более корректного сравнения расчетных и экспериментальных данных также вводится понятие длины начального участка струи [6]:

$$X_{\text{ет}} = X_{\text{е300}}(0,64 + 0,36K_H), \quad (4)$$

где $K_H = \frac{C_{p0}T_0}{C_{pa}T_a}$ – энтальпийный фактор;

C_{p0} , C_{pa} – удельные теплоемкости внешней среды и рабочего тела сопла, соответственно;

T_0 , T_a – температуры внешней среды и рабочего тела в выходном сечении сопла, соответственно;

$X_{\text{е300}}$ – длина начального участка «холодной» струи, которая определяется по числу Маха на срезе:

$$X_{\text{е300}} = R_a \cdot [0,44 + 8,97(\gamma_a)^{0,45}], \quad (5)$$

где γ – показатель адиабаты рабочего газа на срезе сопла при температуре T_a . Для воздуха принят $\gamma = 1,4 = \text{const}$. На Рисунке 51 показано изменение скорости вдоль оси.

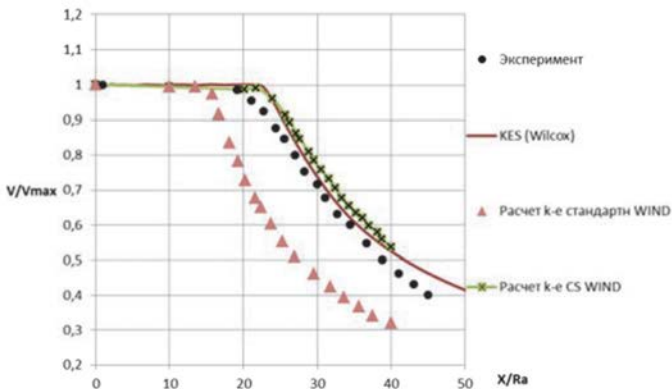


Рисунок 50 – Распределение скорости вдоль оси сопла (сравнение с экспериментом и расчетами в других ПК).

Красная кривая KES (Wilcox) – расчет FlowVision со стандартной моделью турбулентности с настройками по умолчанию

FlowVision показывает хорошее совпадение с экспериментом в области до $2,5 X_{\text{эт}}$ в пределах 7% от экспериментальных данных при использовании модели турбулентности KES (Wilcox). Влияние модели турбулентности представлено на Рисунке 52. Расчеты FlowVision со стандартной k-ε моделью турбулентности без учета сжимаемости показывают существенное занижение скорости на оси сопла и согласуются с расчетами в других кодах (US-Wind). Расчетные исследования подтвердили необходимость учета сжимаемости для k-ε модели турбулентности при определении характеристик сверхзвуковых изобарических струй. Поправка по модели Sarkar KES и модель KEFV дают несколько завышенные значения скорости вдоль оси сопла, увеличивают «дальнобойность» струи и в большей степени согласуются с расчетами на k-ε модели в пакете WIND с учетом влияния сжимаемости (кривая k-ε CS WIND на графике Рисунков 51, 52). Модель SST в форме, используемой FlowVision, показывает самые низкие из всех полученных расчетных значений скорости, существенно отличающиеся от эксперимента. Данную модель не рекомендуется использовать даже для предварительных, оценочных расчетов струй.

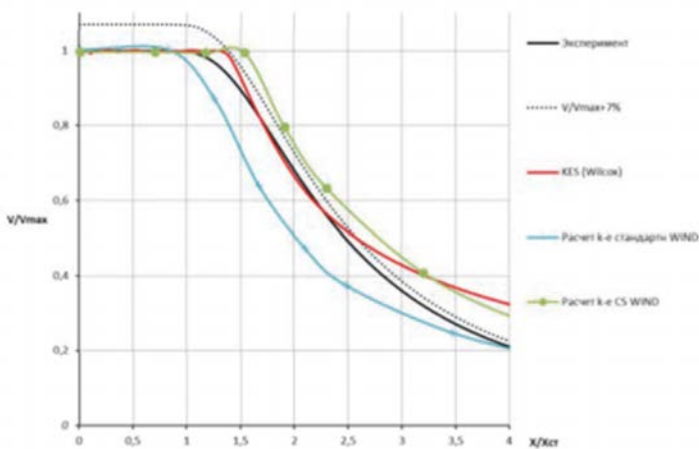


Рисунок 51 – Распределение скорости вдоль оси сопла в зависимости от расстояния, отнесенного к длине начального участка (сравнение с экспериментом).

Красная кривая KES (стандарт) – расчет FlowVision со стандартной моделью турбулентности с настройками по умолчанию

Проведенные дополнительные исследования на адиабатической струе показывают, что результаты расчета не существенно зависят от выбора схемы интегрирования и шага по времени (в пределах от $CFL=1\dots100$). При нерасчетном истечении возникают существенные пульсации скорости в области высоких градиентов при шаге $CFL=100$, которые пропадают при задании меньшего шага (рекомендуется шаг $CFL=10$). Также определено, что наличие спутного дозвукового потока ($M\sim 0.1$) не оказывает существенного влияния на расчетные характеристики струи вдоль оси.

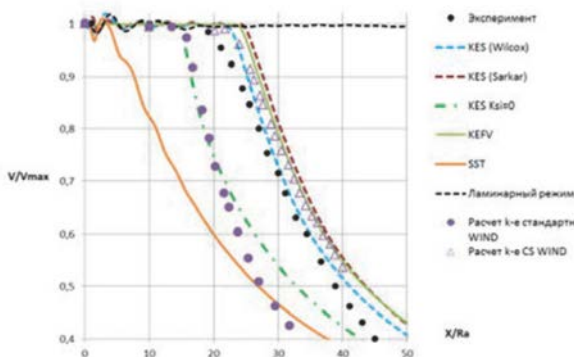


Рисунок 52 – Исследование влияния модели турбулентности ($KES\ Ksi=0$ – стандартная модель KES без учета сжимаемости)

Увеличение температуры струи приводит к некоторому уменьшению скорости по потоку, но погрешность находится в пределах 7%. Результаты расчета с температурой на срезе сопла $T_a = 3000\text{ K}$ хорошо согласуются с экспериментом (см. Рисунок 53).

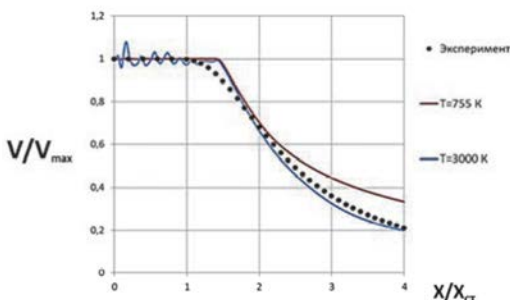


Рисунок 53 – Исследование влияния температуры струи

Результаты расчета для недорасширенного истечения ($n = 1,47$) представлены на Рисунках 54–55. В струе возникают скачки уплотнения и «бочки Маха» на внешней границе, которые можно наблюдать на распределении числа Маха в плоскости симметрии (см. Рисунок 54) и на теневой картине (см. Рисунок 55). При сравнении с расчетным истечением также можно определить, что при возрастании давления на срезе сопла увеличивается начальный участок струи. Теневая картина показана на Рисунке 55.

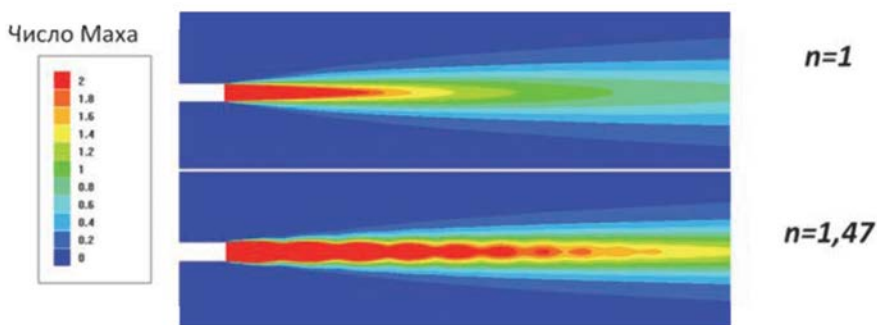


Рисунок 54– Сравнение цветовых контуров числа Маха в плоскости симметрии сопла для двух расчетных случаев тестов Сейнера



Рисунок 55 – Сравнение теневой картины в плоскости симметрии сопла для двух расчетных случаев тестов Сейнера

Сравнение с экспериментом проводится по числу Маха вдоль оси сопла (см. Рисунок 56). Расчет FlowVision показывает хорошее качественное согласование с экспериментальными данными по положению характеристик в струе. Отличие от эксперимента по амплитуде числа Маха первого скачка составляет 8%, отличие на дальнем следе – 11%.

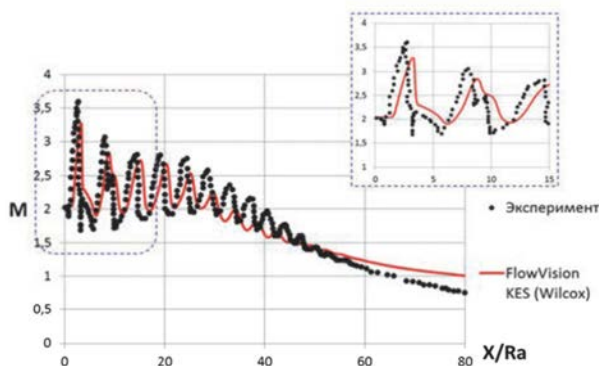


Рисунок 56 – Распределение числа Маха вдоль оси сопла для нерасчетного истечения

Сопло в спутном потоке

Описание задачи

Проводится расчет «холодной» сверхзвуковой струи в спутном сверхзвуковом потоке [2]. Рассматривается постановка с обтеканием корпуса экспериментальной установки и истечение из осесимметричного сопла. В работе приводится один из тестов: расчетное истечение. Задается степень понижения давления в сверхзвуковом сопле:

$$NpR = \frac{p_e^*}{p_0}, \quad (6)$$

где p_e^* – давление торможения в дозвуковой части сопла, p_0 – статическое давление в расчетной области.

При проведении верификационных расчетов требуется определить характеристики потока вдоль оси сопла на расстоянии от оси $Y/D = 1$.

Постановка задачи

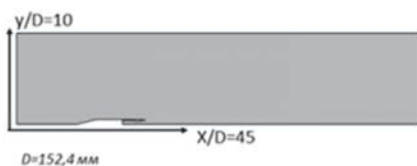
Геометрическая модель восстановлена по рабочим чертежам установки [2], ее модель представлена на Рисунке 57. Расчет проводится аналогично 1-й рассмотренной задаче со всеми указанными выше настройками, в двумерной постановке, однако сопло моделируется от участка сужения в дозвуковом потоке («камеры сгорания»), на входе в сопло задается полное давление и температура, а по границам расчетной области – неотражающее ГУ. Все граничные условия, использованные при создании модели, приведены на Рисунке 58. Исходные данные представлены в Таблице 2.

Таблица 2

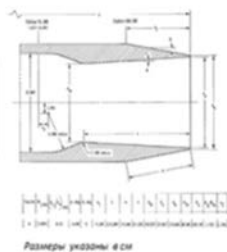
Исходные данные

Параметры спутного потока			Параметры в сопле	
T_0 , К	p_0 , Па	M_0	NpR	T^*_c , К
317	101325	2,2	8,12	317

Расчетная область



Чертеж сопла



Результаты расчета

Ударно-волновая картина течения показана в виде заливки по числу Маха (см. Рисунок 60). Сравнение с экспериментом и данными, полученными в других расчетных кодах, проводится по статическому давлению и числу Маха на расстоянии $Y/D=1$ от оси сопла [7]. Результирующие графики представлены на Рисунках 61 и 62.

Расчет FlowVision показывает хорошее совпадение с экспериментом, по амплитуде и локализации скачка уплотнения в потоке, отличие по числу Маха составляет не более 3%.

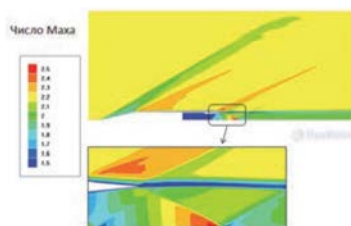


Рисунок 60 – Поля числа Маха

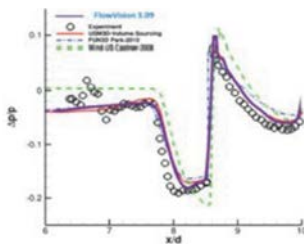


Рисунок 61 – Изменение статического давления вдоль оси
на расстоянии $Y/D=1$

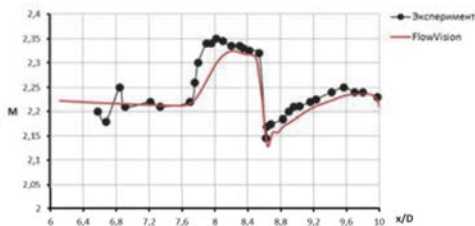


Рисунок 62 – Изменение числа Маха вдоль оси на расстоянии $Y/D=1$

Проведена верификация ПК FlowVision для расчета характеристик сверхзвуковых турбулентных струй. В результате проведения верификационных расчетов получены данные, хорошо согласующиеся с экспериментом.

В ходе проведения работы сформулированы общие рекомендации по созданию методики расчета сверхзвуковых турбулентных струй в ПК FlowVision, определены предпочтительные настройки модели.

Рекомендуется использовать расчетную сетку с количеством не менее 40 ячеек по ширине сопла для расчетного истечения; для разрешения градиентов в скачках уплотнения, образующихся на нерасчетном режиме, необходима более подробная сетка, не менее 80 ячеек по радиусу. Проведено исследование влияния модели турбулентности на расчетные характеристики. Модели KES (Sarkar) и KEFV дают несколько завышенные значения скорости вдоль оси сопла; модель SST не рекомендуется использовать даже для предварительных, оценочных расчетов струй из-за существенного занижения длины начального участка струи. Наиболее приемлемой для расчетов сверхзвуковых изобарических струй является стандартная k-ε модель турбулентности с поправками на сжимаемость (модель Wilcox); которые присутствуют в интерфейсе настроек ПК FlowVision по умолчанию. Так данная модель показала отличие в скорости от экспериментальных данных для расчетного сопла в пределах 7%, для нерасчетного – 11% отличие по числу Маха. Для тестового случая работы сопла в спутном потоке удалось достичь 3% отклонения по числу Маха от эксперимента.

Показано сравнение расчетов в ПК FlowVision с расчетами в других современных расчетных кодах, которое подтверждает адекватность и преимущество методики расчета с использованием ПК FlowVision.

Список литературы

1. *Seiner, J.M., Ponton, M.K., Jansen, B.J., and Lagen, N.T.* The Effect of Temperature on Supersonic Jet Noise Emission// DGLR/AIAA Paper 92-02-046.-1992.
2. *Putnam, L. E. and Capone, F. J.* Experimental Determination of Equivalent Solid Bodies to Represent Jets Exhausting into a Mach 2.20 External Stream/ NASA-TN-D-5553, Dec. 1969.
3. NPARC Alliance Verification and Validation Archive [электронный ресурс]
4. FlowVision Руководство пользователя. ТЕСИС, 2015

5. *Wilcox D. C.* Turbulence modeling for CFD. - DCW Industries, Inc., 460 p.
6. *Сафронов А. В.* О применимости моделей турбулентной вязкости для расчета сверхзвуковых струйных течений //Физико-химическая кинетика в газовой динамике 2012, Т.13
7. *Melissa B. Carter, Sudheer Nayani, Alaa A. Elmiligui, and Richard L. Campbell.* "USM3D predictions of Supersonic Nozzle Flow", 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA Aviation, (AIAA 2014-2270)

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВОЗВРАЩАЕМЫЙ АППАРАТ И ДИНАМИКИ ЕГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПОСАДКЕ НА ВОДУ

Дядькин А.А., Павлов А.О., Симакова Т.В., Чёткин С.В.
ОАО «ОАО РКК «Энергия», г. Королев, Россия

В данной статье рассматривается решение задачи посадки на воду возвращаемого аппарата (ВА) пилотируемого транспортного корабля (ПТК) нового поколения в нештатных ситуациях. Целью исследования является определение гидродинамических воздействий на аппарат в процессе приводнения и динамики его движения в водной среде после приводнения. Посадка ВА на воду является одним из расчётных случаев нагружения и прочности конструкции. [Burkhalter, Patel, 2011]

Для исследований используется программный комплекс (ПК) FlowVision. В соответствии с принятой в РКК «Энергия» технологией применения компьютерного моделирования для проектных исследований [Роль компьютерного моделирования и физического эксперимента в исследованиях аэрогазодинамики ракетно-космических систем в процессе проектирования, 2014] промышленным расчётам предшествует тестирование ПК, выбранного для решения задачи. В работе представлены некоторые результаты тестирования ПК FlowVision с использованием экспериментальных данных, полученных для аналога и масштабной модели ПТК. В качестве аналога использована модель масштаба 1:4 посадочного модуля корабля Apollo [Stubbs, 1967].

Системы координат

В исследованиях использованы системы координат, представленные на Рисунке 63.



Рисунок 63 – Системы координат для модели Apollo и модели ВА ПТК

В расчётах для модели ВА ПТК варьируемыми параметрами являются его высота над уровнем водной поверхности, отсчитываемая от центра масс, и угол между нормалью к поверхности и осью симметрии аппарата. В расчётах для модели Apollo варьируемыми параметрами являются скорость входа в воду и угол между нормалью к поверхности и осью симметрии.

Модельные испытания

Модель Apollo

Испытана динамически подобная модель масштаба 1:4 (Рисунок 64). На модели устанавливались акселерометры и пять панелей с 3 датчиками давления под каждой из них (Рисунок 65). По показаниям датчиков определялось осреднённое давление, действующее на соответствующие панели А, В, С, D, Е.



Рисунок 64 – Модель Apollo в расчёте и эксперименте

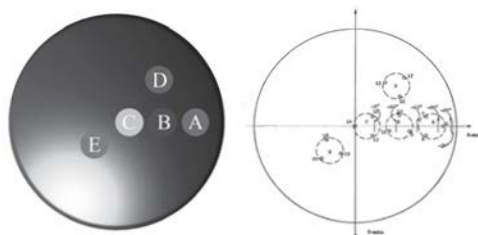


Рисунок 65 – Расположение датчиков на модели Apollo в расчёте и эксперименте

Модель подвешивалась на подбираемой к требуемой скорости входа высоте H под заданным углом α между продольной осью аппарата и поверхностью воды и отпускалась. К моменту касания водной поверхности модель достигала скорости $V_{\text{вх}}$. Режимы испытаний приведены в Таблице 1.

Таблица 1

№ расчёта	1	2	3
№ запуска	11, 12, 13	5, 6, 7	9, 10
Угол, °	26	20	23
Скорость входа, м/с	9.45	9.63	11

На многих режимах испытания дублировались, при этом использовалась сквозная нумерация запусков. В таблице указаны также номера расчётов, выполненных с использованием FlowVision для соответствующих режимов испытаний. В процессе испытаний определялись максимальные осреднённые давления для панелей и максимальные продольные ускорения (перегрузки).

Модель ПТК

Использована динамически подобная модель ВА ПТК масштаба 1:10 (Рисунок 66). На защитном экране модели установлены 6 датчиков давления (Рисунок 67), два из которых расположены в нише посадочного устройства. Используются датчики Honeywell S с диапазоном измерений 7...34 кгс/см². Перегрузка, действующая на модель, измерялась датчиком PCB PIEZOTRONICS с диапазоном измерений до 100g. В части испытаний производилась видеозапись процесса высокоскоростной камерой, по записям которой определялись координата, скорость и ускорение центра масс модели.



Рисунок 66 – Модель ВА ПТК в расчёте и эксперименте

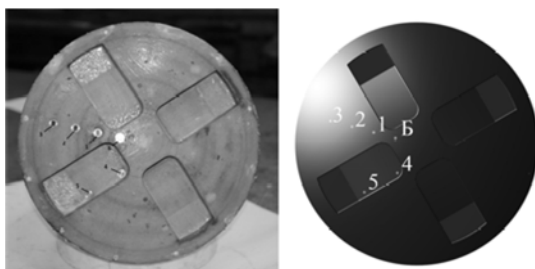


Рисунок 67 – Расположение датчиков на модели ВА ПТК в расчёте и эксперименте

Схема испытаний аналогична использованной в экспериментах с моделью Apollo. Режимы испытаний приведены в Таблице 2.

Таблица 2

№ расчёта	1	2	3	4	5
№ запуска	1, 2	3, 4, 5	6, 7, 8	9	10, 11, 12
Высота, мм	125	259	250	175	166
Скорость входа, м/с	1.57	2.25	2.21	1.85	1.80
Угол, °	0	0	15	15	0

Испытания проведены в оптовом бассейне НИО-12 ФГУП ЦАГИ.

Результаты расчётов

В работе представлены наиболее характерные результаты расчётов и их сравнений с данными испытаний. В частности:

- сравнение осредненных по площади максимальных давлений на панелях модели Apollo натуральных размеров при скорости $V_{вх} \sim 10.73$ м/с и $\alpha = 23^\circ$ (Рисунок 68)

– сравнение расчётных и экспериментальных значений максимальных перегрузок, действующих на модель Apollo натурных размеров при $V_{вх} \sim 10.73$ м/с и $\alpha = 23^\circ$ (Рисунок 69)

– сравнения изменения по времени скорости движения и координаты центра масс для модели ВА ПТК при угле входа 0° и скоростях входа $V_{вх} = 2.25$ м/с (Рисунок 70) и 1.57 м/с (Рисунок 71)

– сравнения изменения по времени продольных перегрузок n_x для модели ВА ПТК при угле входа 0° и скоростях входа $V_{вх} = 2.25$ м/с (Рисунок 72) и 1.57 м/с (Рисунок 73)

– сравнения изменения по времени расчётных значений давления в точках расположения датчиков с максимальными экспериментальными показаниями датчиков 1–5 и датчика Б (Рисунок 73) при скорости входа 2.25 м/с и угле 0°

На рисунках приведены избыточные по сравнению с атмосферным давлением.

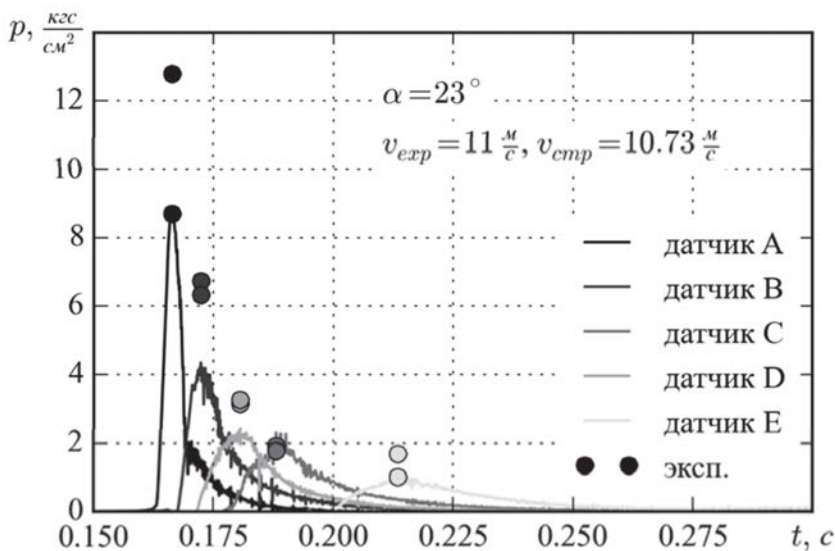


Рисунок 68 – Давление на панелях Apollo натурных размеров (скорость в расчёте 10.73 м/с, в эксперименте 11 м/с)

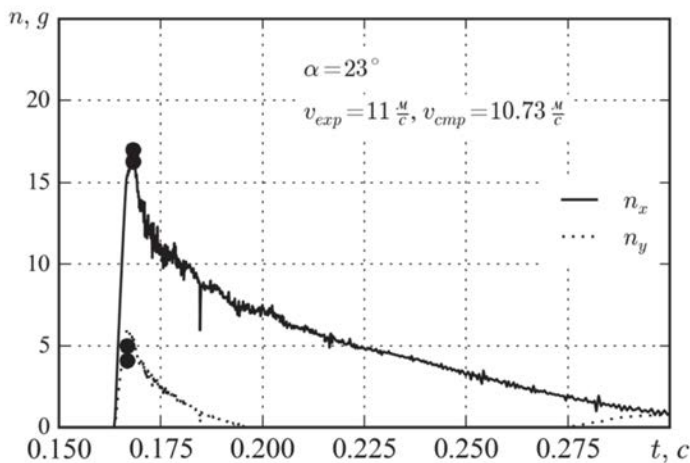


Рисунок 69 – Изменение по времени продольной и поперечной перегрузки, действующей на модель Apollo натурных размеров (скорость в расчёте 10.73 м/с, в эксперименте 11 м/с)

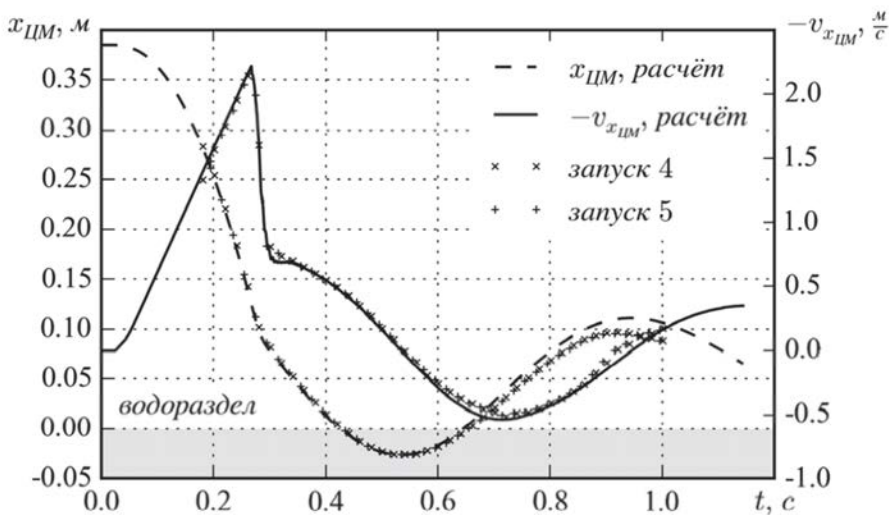


Рисунок 70 – Изменение по времени продольной координаты и продольной скорости центра масс ВА ПТК в модельном расчёте 2 и запусках 4, 5 ($H_{\text{ЦМ}}^0 = 385$ мм)

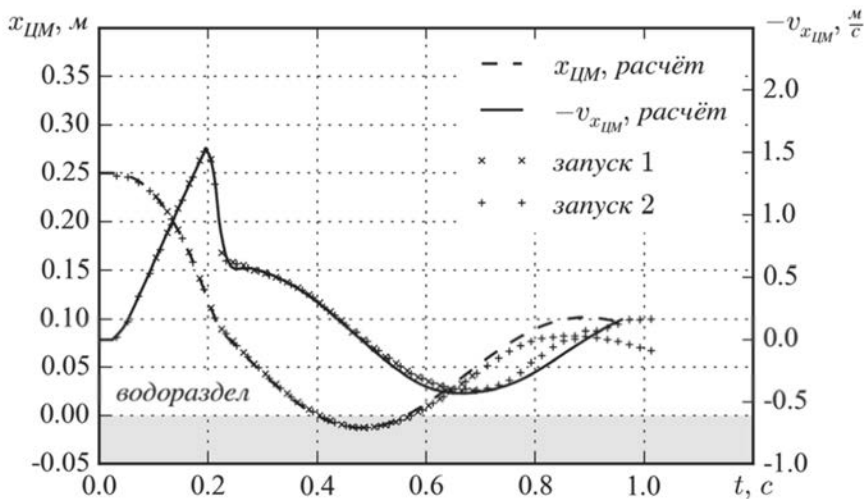


Рисунок 71 – Изменение по времени продольной координаты и продольной скорости центра масс ВА ПТК в модельном расчёте 1 и запусках 1, 2 ($H_{\text{ЦМ}}^0 = 250$ мм)

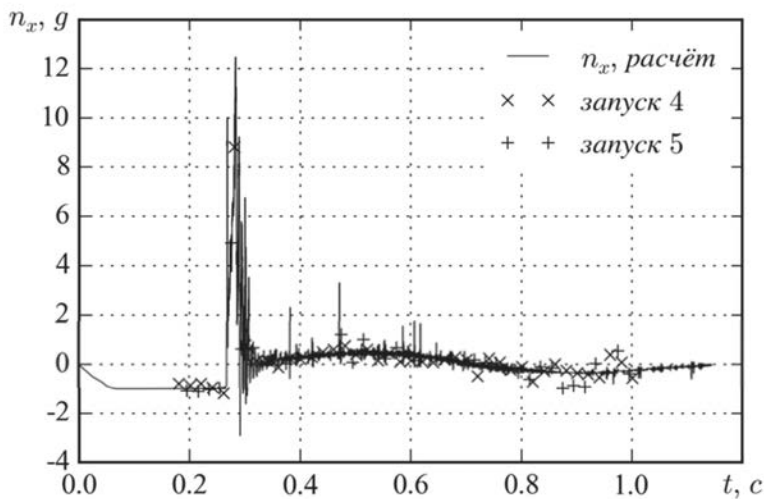


Рисунок 72 – Изменение по времени продольной перегрузки, действующей на модель ВА ПТК, в модельном расчёте 2 и запусках 4, 5

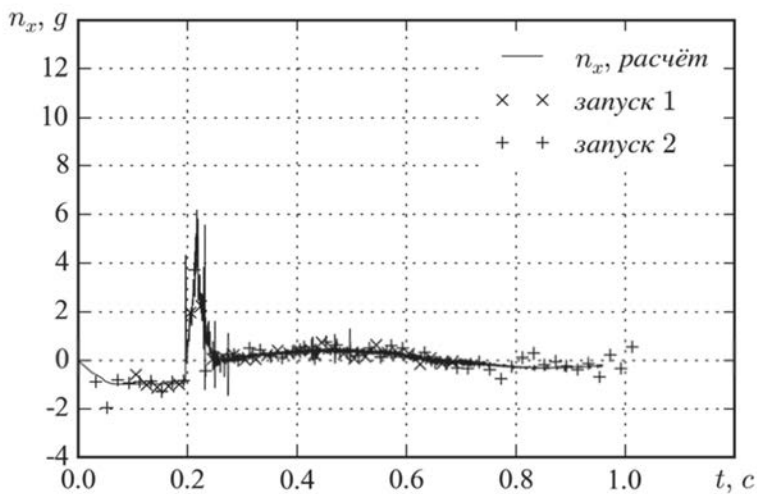


Рисунок 73 – Изменение по времени продольной перегрузки, действующей на модель ВА ПТК, в модельном расчёте 1 и запусках 1, 2

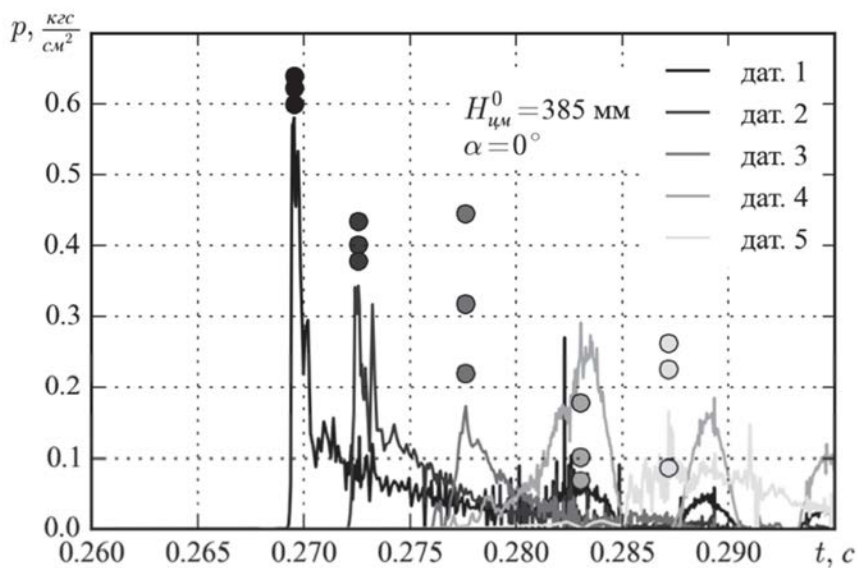


Рисунок 74 – Изменение по времени показаний датчиков 1–5 для модели ВА ПТК в расчёте 2

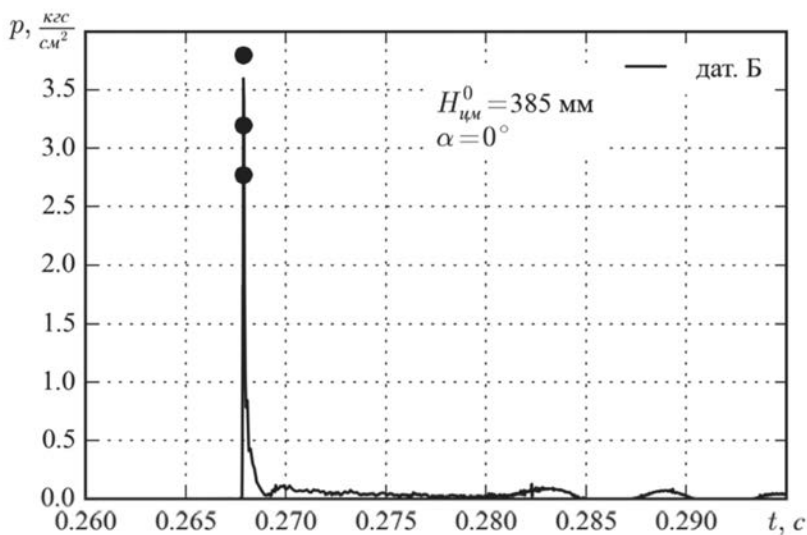


Рисунок 75 – Изменение по времени показаний датчика Б для модели ВА ПТК в расчёте 2

Заключение

Представленные на рисунках сравнения значений результатов расчётных и экспериментальных исследований приводнения моделей Apollo и ВА ПТК показывают удовлетворительные согласования данных по давлениям и параметрам движения, на основании чего можно сделать вывод о возможности и целесообразности использования ПК FlowVision для анализа процесса приводнения ВА ПТК.

Расчётные и экспериментальные исследования показывают, что продольные перегрузки и избыточные давления при приводнении ВА достигают очень больших значений, критичных с точки зрения прочности конструкции. С целью уменьшения действующих при приводнении продольных перегрузок и давлений при моделировании посадки на воду ВА ПТК рассмотрен вариант модели с выпущенными посадочными устройствами (ПУ). Результаты расчётов в виде зависимостей от времени средних по площади смачиваемой поверхности значений давлений для варианта с ПУ и без ПУ представлены на Рисунке 76.

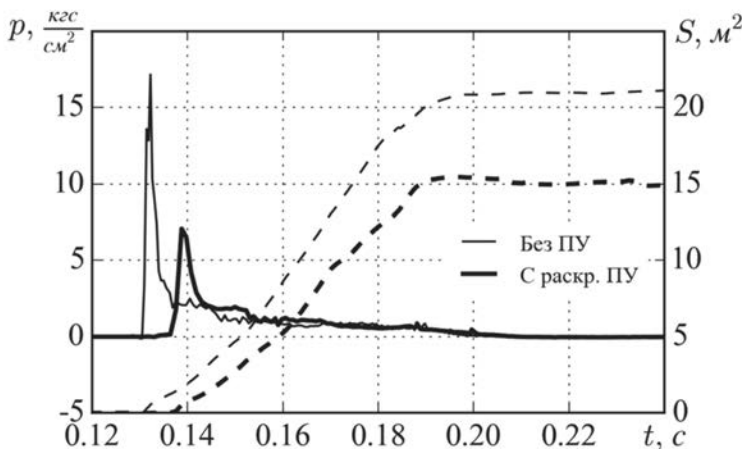


Рисунок 76 – Давление на смачиваемую поверхность и её площадь для моделей ВА ПТК с открытым контейнером с выпущенными ПУ и без них, скорость приводнения 8 м/с

Список литературы

1. *Drew Burkhalter, Mahesh Patel.* Crew module water landing simulation methods development for NASA // Altair Engineering Inc., 2011
2. *Алабова Н.П., Брюханов Н.А., Дядькин А.А., Крылов А.Н., Симакова Т.В.* Роль компьютерного моделирования и физического эксперимента в исследованиях аэрогазодинамики ракетно-космических систем в процессе проектирования // Космическая техника и технологии №3(6), 2014. С. 14–21.
3. *Sandy M. Stubbs.* Dynamic model investigation of water pressures and accelerations encountered during landings of the Apollo spacecraft // NASA TN D-3980, 1967.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ БУТЫЛКИ С ВОДОЙ

Бегишева Л.Р.

ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

В настоящее время задачи взаимодействия жидкости либо газа с твердым телом, так называемые Fluid-Structure Interaction, представляют большой интерес и имеют практическую важность не только в различных об-

ластях науки и техники, но и в массовом производстве бытовых конструкций и устройств.

В данной работе рассматривается задача падения пластиковой бутылки с водой. Динамика жидкости считается с использованием ПК FlowVision, расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) бутылки проводится в прочностном комплексе Abaqus.

Целью работы является определение напряженно-деформированного состояния бутылки с водой при падении на твердую поверхность.

Расчетная область в ПК FlowVision представляет собой параллелепипед с размерами 0.3x0.4x0.3 м, в которую импортируется бутылка как подвижное тело. К подвижному телу применяется опция Вывернуть наизнанку.

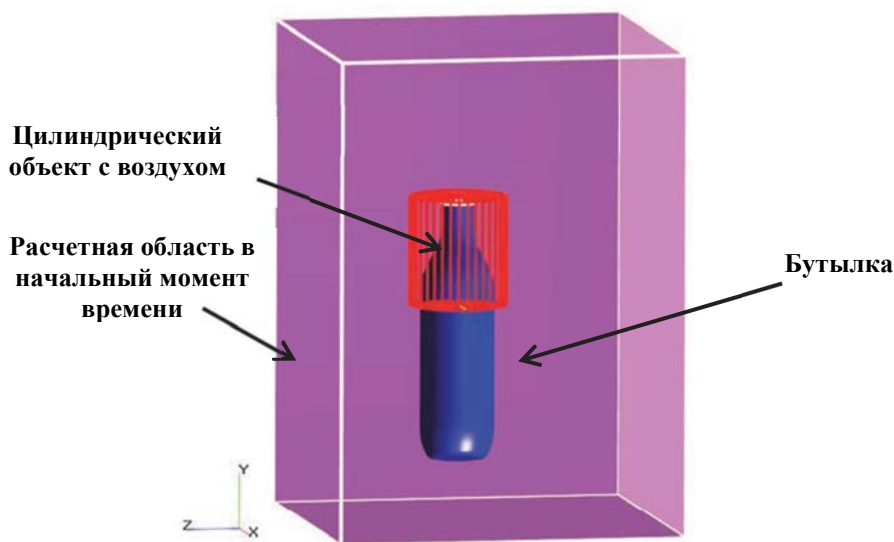


Рисунок 77 – Расчетная область во FlowVision

На первой итерации расчетной областью является весь параллелепипед, затем, за счет опции выворачивания наизнанку, происходит инвертирование расчетной области внутрь бутылки и расчетной областью уже становится внутренний объем бутылки.

В начальных условиях задается содержание воды во всей бутылке и лишь в области, ограниченной цилиндрическим объектом, определяется –

воздух. Свойства воды и воздуха берутся из базы веществ ПК FlowVision. Граничными условиями поверхностей параллелепипеда и бутылки является стенка,

Для моделирования падения бутылки задается гравитационная составляющая, равная 9.8 м/с^2 и в начальных данных - скорость воздуха и воды, равная 1.4 м/с , по направлению, противоположном направлению оси Y.

В качестве физических процессов для воздуха и воды выбирается движение ньютоновской жидкости.

Расчетная сетка включает в себя адаптацию по поверхности бутылки 2 уровня в 2 слоя ячеек и насчитывает около 100 тыс. ячеек.

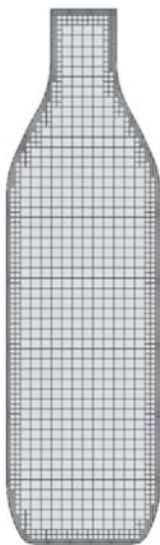


Рисунок 78 – Расчетная сетка

Выбирается неявная новая схема решения. Шаг по времени определяется с помощью числа КФЛ. Конвективный КФЛ = 1, поверхностный = 0,5. Для всех задач с подвижными стенками, включая задачи FSI значение поверхностного КФЛ рекомендуется задавать равным 1 или меньше.

Конечно - элементная модель в ПК Abaqus включает в себя жесткую поверхность, моделирующую пол и деформируемую бутылку. Свойства материала пластиковой бутылки заданы плотностью: 1300 кг/м^3 , модулем

упругости: 2.3 ГПа, коэффициентом Пуассона: 0.3, а также зависимостью напряжений от пластических деформаций.

Поверхность пола жестко заделана по всем степеням свободы. Между бутылкой и полом задается контактное взаимодействие. Бутылка находится в однородном поле силы тяжести с ускорением свободного падения, равным 9.8 м/с^2 и направленным противоположно оси Y.

Конечно-элементная, сетка состоит из 4-узловых оболочечных элементов S4R и включает в себя 5442 узлов и 5440 элементов.

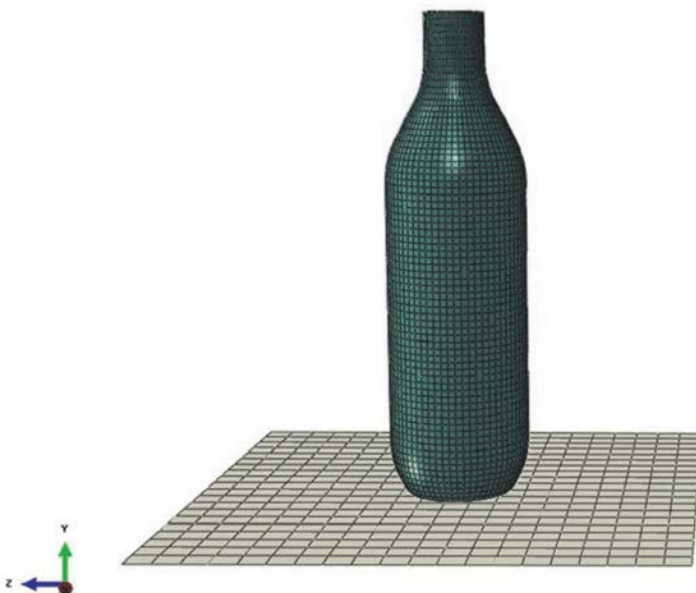


Рисунок 79 – Конечно-элементная модель бутылки и пола

Для решения задачи в FSI постановке выбирается процедура Dynamic/Implicit с учетом больших перемещений и автоматическим выбором шага по времени.

Связь ПК FlowVision и Abaqus происходит посредством технологии прямой связи SIMULIA Direct Coupling. Шаг обмена между программами задается равным каждому шагу по времени в ПК FlowVision. При каждом обмене ПК FlowVision получает от ПК Abaqus координаты узлов нового

положения бутылки, а в ПК Abaqus от ПК FlowVision – сосредоточенные силы в узлах.

Численное моделирование проводится таким образом, чтобы в начальные моменты времени происходил удар бутылки о жесткий пол и, далее следовал отскок бутылки вверх.

Результаты расчета представлены на Рисунках 80–82.

На Рисунке 80 изображено поведение воды внутри бутылки при ударе и отскоке бутылки от жесткого пола.



Рисунок 80 – Свободная поверхность воды в моменты времени от начала расчета до 0.03 сек. с шагом 0.005 сек.

При отскоке бутылки от поверхности происходит смятие дна бутылки вовнутрь, что показано на Рисунке 81.

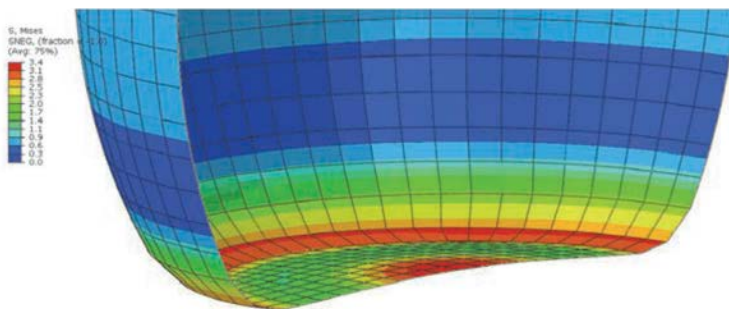


Рисунок 81 – НДС бутылки в момент отскока от поверхности, МПа

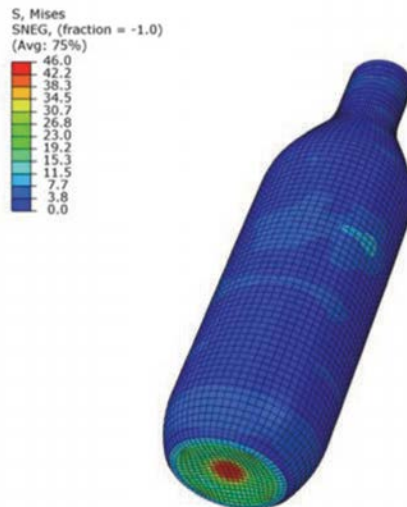


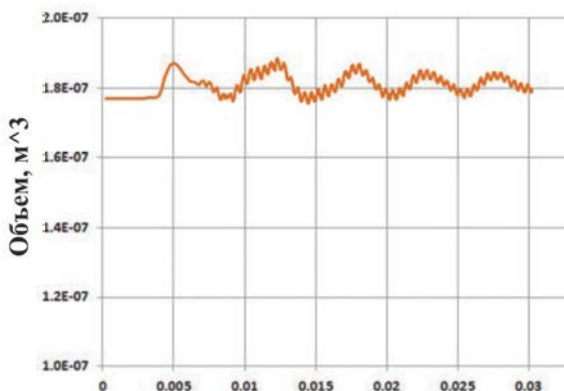
Рисунок 82 – НДС бутылки в момент времени 0.03 сек, МПа

Напряжения, полученные при моделировании, не превышают допускаемые напряжения для данного вида пластика. В процессе счета поверхность бутылки слегка деформируется: бутылка вздувается и раздувается.

На Рисунке 83 и 84 показаны графики зависимостей изменения объема воды и воздуха по времени.



Рисунок 83 – Изменение объема воды



Физическое время, с

Рисунок 84 – Изменение объема воздуха

Изменение объема воды составляет 1.4%, а изменение объема воздуха 5.1%, таким образом, обеспечена приемлемая точность для выполнения закона сохранения массы – что является сложной проблемой при решении FSI задач.

Получена реалистичная картина динамики воды при падении бутылки, напряженно-деформированное состояние пластиковой бутылки также является корректным. Следовательно, подобный класс задач, возможно, успешно решать в FSI постановке с использованием ПК FlowVision и Abaqus.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАПАНА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Бегишева Л.Р.

ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

В работе рассматривается одна из типовых конструкций клапанов, применяемых в гидравлических устройствах для поддержания в нем постоянного расхода жидкости при различных перепадах давления. Задача и решается в FSI постановке с использованием ПК FlowVision и Abaqus.

Целью данного исследования является построение расходно-напорной характеристики клапана.

Клапаны гидравлических устройств предназначены для управления потоками жидких и газообразных сред. При повышении давления среды проходной канал клапана сужается, что позволяет предотвратить рост расхода.

Во FlowVision в качестве расчетной области импортируются система из двух труб разных диаметров, между которыми вставляется подвижное тело клапана. Диаметр тонкой трубы равен 3.8 мм, большой = 7.64 мм, длина системы труб равна 20 мм. Диаметр клапана, соответственно, равен 7.65 мм, высота = 3.5 мм.

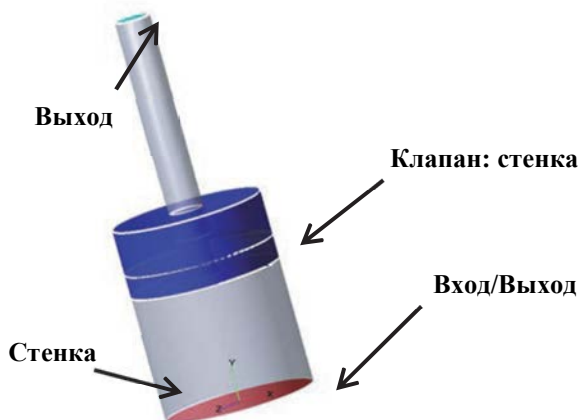


Рисунок 85 – Расчетная область с указанием граничных условий и деформируемый клапан

Выполняется шесть расчетов с различными значениями давления на входе, равными от 0.1 до 0.6 МПа.

В качестве жидкости используется вода из базы веществ FlowVision. На входе в трубу большего диаметра задается полное давление, соответствующее расчетному случаю, а на выходе из трубы меньшего диаметра – условие свободного выхода, на всех остальных поверхностях трубы и клапана задаются граничные условия – «стенка».

Начальная сетка имеет размерность 40 x 110 x 40 ячеек. Проводится исследование сходимости по сетке с адаптацией по поверхности подвижного

тела с 1-ого по 4 максимальный уровень. Исследование показало незначительное изменение расхода жидкости с изменением сетки, что позволяет выбрать 2-ой уровень адаптации и все расчеты проводятся с его использованием.

Для моделирования выбраны следующие физические процессы: ньютоновская жидкость, k-е модель турбулентности (KES).

В начальный момент времени вода находится во всей расчетной области с соответствующим расчетному случаю давлением. В параметрах турбулентности принято: пульсации = 0.01, масштаб турбулентности = 0.0001.

Выбирается неявная новая схема решения. Конвективный CFL = 50, поверхностный CFL = 1.

Конечно-элементная, модель в прочностном комплексе Abaqus состоит из жесткого объемного корпуса и деформируемого клапана.

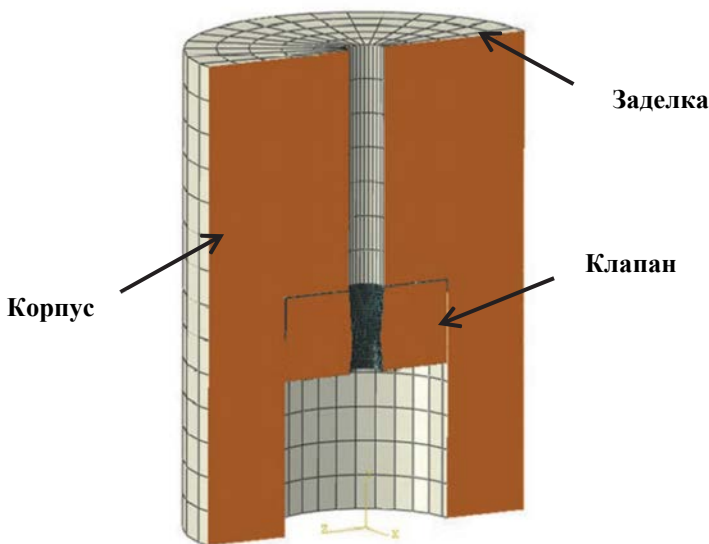


Рисунок 86 – Конечно-элементная модель корпуса и клапана
(разрез в плоскости симметрии)

Клапан имеет свойства гиперэластичного материала с плотностью = 1100 кг/м³.

Корпус жестко заделывается в верхней части. Между корпусом и клапаном задается контактное взаимодействие типа Surface-to-surface.

Для моделирования клапана используются линейные шестигранные элементы с контролем hourglass. Сетка состоит из 17920 узлов и 15936 элементов.

Используется многошаговый анализ, состоящий из статической процедуры для установления клапана в необходимое положение Static/General и неявной динамической процедуры – FSI расчета Dynamic/Implicit.

Связь ПК FlowVision и Abaqus происходит посредством технологии прямой связи SIMULIA Direct Coupling. На Рисунке 87 показаны обозначения: радиус R1 – радиус внешнего отверстия проходного канала клапана и радиус R2 – радиус внутреннего отверстия.

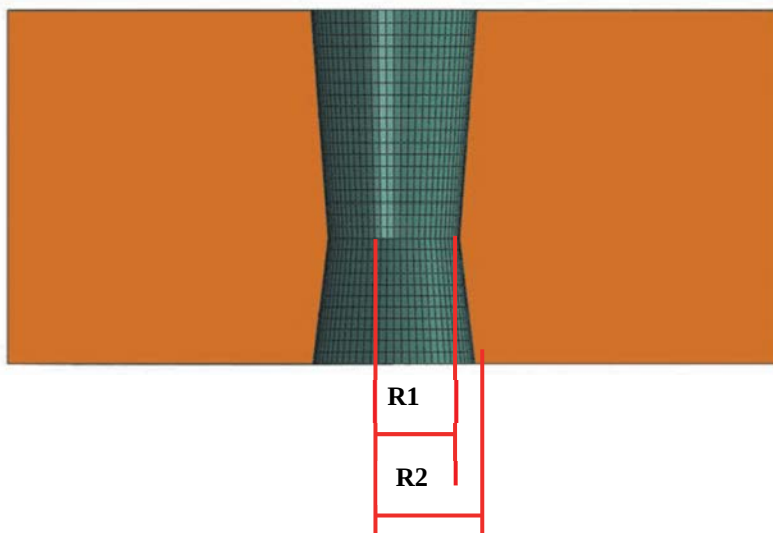


Рисунок 87 – Обозначения радиусов проходного канала клапана

На Рисунках 88–90 представлены результаты расчетов.

На Рисунке 88, сделанного с помощью ПК FlowVision, показано сужение проходного канала клапана с увеличением давления.

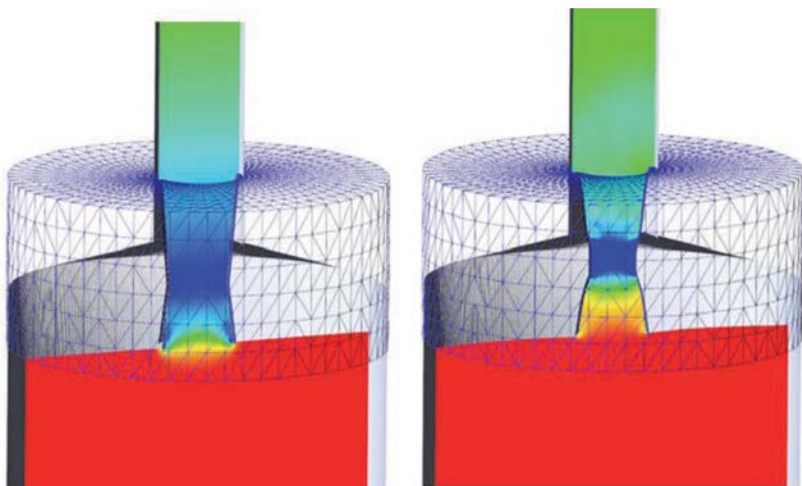


Рисунок 88 – Распределение давления воды для первого и шестого расчетных случаев (слева направо)

Рисунок 89, сделанный в ПК Abaqus, демонстрирует увеличение напряжения стенок проходного канала с увеличением давления в нем.

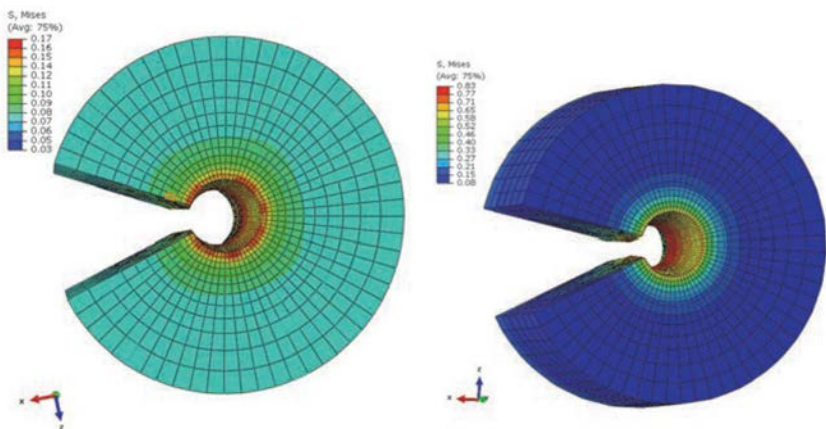


Рисунок 89 – Напряжения клапана для первого и шестого расчетных случаев, МПа (слева направо)

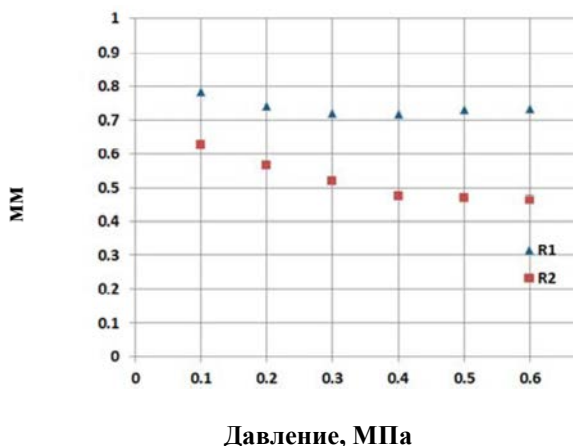


Рисунок 90 – График зависимости изменения радиусов клапана для шести расчетных случаев

График изменения радиусов клапана для шести расчетных случаев и соответствующих давлений на входе, представлен на Рисунке 90. Изменение внешнего радиуса для расчетного случая с максимальным давлением составляет 11.2 %, внутреннего – 21.3 %.

На Рисунке 91 представлен график расхода жидкости для всех шести расчетных случаев. Изменение расхода жидкости с увеличением давления не происходит, что и показывает правильную работу клапана.

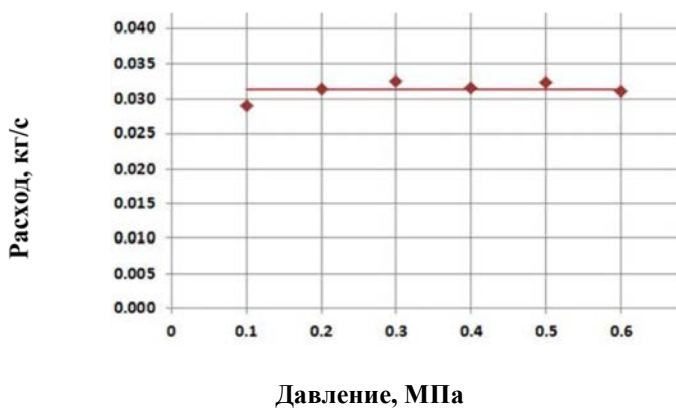


Рисунок 91 – График расхода жидкости для шести расчетных случаев

Решение задач совместного моделирования жидкости и деформируемой конструкции подобного типа в FSI постановке является наиболее точным по сравнению с решением задачи только с помощью одного программного комплекса. Полученные результаты отображают реалистичную картину поведения жидкости и работы клапана – с увеличением давления жидкости происходит сужение проходного канала клапана, а расход жидкости не изменяется.

СПЕЦИФИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ С АБРАЗИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ТРУБОПРОВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПК FLOWVISION

Закирничная М.М.¹, Передерей Т.И.¹,
Исанчурина Г.Ф.¹, Адеев И.Ю.²

¹ УГНТУ, г. Уфа, Россия

² ООО «Газпром трансгаз Уфа», г. Сибай, Россия

Анализ статистики отказов отводов газопроводов

При эксплуатации объектов газонефтяной промышленности протекают различные процессы, негативно влияющие на техническое состояние оборудования. По причине газоабразивного изнашивания существенно снижается надежность трубопроводной обвязки и, соответственно, увеличиваются эксплуатационные затраты, возникают незапланированные ремонтные работы. Наиболее сильно данному воздействию подвержены отводы трубопроводной обвязки компрессорных и газораспределительных станций, камер приема очистных устройств, крановых узлов и др.

Распределение аварий на газопроводах разных диаметров по причинам их возникновения представлено в Таблице 1.

Целью работы является изучение влияния эксплуатационных параметров, диаметра и массы взвешенных частиц на скорость газоабразивного износа отводов трубопроводов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ статистики причин отказов отводов газопроводов;

- определение массы металла, сцарапанного со стенки отвода при механическом воздействии абразивных частиц, транспортируемых потоком газа;
- проведение верификации реальных объектов и расчетных моделей с использованием ПК FLOWVISION;
- определение изменения местоположения зоны максимальной концентрации абразивных частиц на стенке отвода в зависимости от давления, массы абразива на входе и диаметра абразивных частиц.

Таблица 1

**Распределение аварий на газопроводах разных диаметров
по причинам их возникновения**

Причины возникновения, %		По газопроводам разных диаметров, мм						
		1420	1220	1020	820	720	530	<530
Дефект труб	9,4	11,1	6,2	19,7	0	12,9	1,8	7,4
Дефект заводского оборудования	3,0	8,3	1,6	2,6	0	3,2	0	4,9
Брак строительно-монтажные работы	25,8	52,8	39,1	29,0	23,3	12,9	25,4	11,1
Нарушение проекта	0,2	0	0	1,3	0	0	0	0
Нарушение ПТЭ	5,9	5,5	0	4,0	3,4	6,5	10,9	9,9
Внутренняя коррозия и эрозия	4,0	0	0	1,3	0	8,1	5,5	8,7
Наружная коррозия	22,0	5,6	35,9	32,9	50,0	14,5	9,1	12,4
Механические повреждения	21,0	0	9,4	5,3	23,3	29,0	38,2	35,8
Термическое воздействие	0,5	0	1,6	0	0	1,6	0	0
Стихийные бедствия	4,2	13,9	3,1	1,3	0	4,8	3,6	4,9
Прочие причины	4,0	2,8	3,1	2,6	0	6,5	5,5	4,9

Объект исследования

Для изучения закономерности процесса газоабразивного изнашивания исследовались четыре фрагмента отводов газопроводов, отличающиеся эксплуатационными условиями и разной степенью износа (Рисунки 92, 93), из стали 09Г2С, условным диаметром 80 мм, наружным диаметром 89 мм.



Рисунок 92 – Внешняя поверхность исследуемых фрагментов отводов
№ 1 – № 4



Рисунок 93 – Внутренняя поверхность фрагментов отводов
с газоабразивным износом

Характеристики отводов представлены в Таблице 2.

Отвод № 1 находился на линии сброса газа в емкость сбора конденсата на газораспределительной станции (ГРС). Ежедневно газопровод продувался по 10 секунд для удаления конденсата и продуктов сварочного производства.

Таблица 2

Характеристики отводов

Номер фрагмента отвода	Диаметр частиц, мм	Рабочая температура, °С	Рабочее давление, МПа	Масса абразива на входе в систему, кг
1	1,0	10	3,4	0,5
2	1,0	10	3,2	0,25
3	0,1	10	3,2	0,25
4	0,1	10	6,4	10,0

Отводы № 2, 3 находились на свечной линии контура ГРС (линии стравливания газа в атмосферу). Продувка осуществлялась 1 раз в месяц в течение трех лет.

Отвод № 4 находился на свечной линии камеры приема очистных устройств на линии стравливания в дренажную емкость. Продувку отвода осуществили 12 раз по 20 секунд, затем произошло разрушение стенки в результате образования свища. Масса абразива, которая удалялась за 1 продувку через отводы № 1 – № 4, была установлена на основании результатов экспериментальных продувок в емкость сбора конденсата. Преимущественно диаметр частиц установлен 0,1 мм и 1,0 мм.

Расчет газодинамики потока среды в исследуемых отводах

При помощи программного комплекса (ПК) КОМПАС-3D создавалась объемная модель с присвоением ей физических свойств с целью схожести с реальными объектами. Расчет газодинамики потока среды в исследуемых отводах проводился с использованием ПК FLOWVISION.

В основе ПК FLOWVISION версия 3.09.03 - метод конечных объемов, высокоточные разностные схемы, эффективные численные методы и надежные математические модели физических процессов. По сравнению с

ранними версиями появилась возможность расчета частиц в дисперсной среде с переносом фазы.

Расчет течения газа в трубопроводе относится к задачам внутреннего течения, поэтому достаточно импортировать геометрию проточной части, при этом внутренний объем трубопровода должен быть представлен как твердотельная модель.

Для создания процесса движения газоабразивного потока необходимо в препроцессоре создать вещества. Несущей фазой является газ, поэтому из стандартной базы данных загрузили газ метан равновесный CH_4 . В качестве материала абразивной массы использовался материал литейной стали 25Л (7830 кг/м^3).

При задании фаз присваивали физические процессы выбранным веществам. Для сплошной фазы (газ) использовали процесс движения, для дисперсной фазы (сталь) были выбраны процессы: перенос фазы, движение и массоперенос (Рисунок 94).

Следующим шагом создали модель и присвоили ей заданные фазы (Рисунок 95). В окне свойств «Взаимодействие фаз» сплошная – дисперсная фаза выбрали «Модель 2», это позволяет текущему газу взаимодействовать с вашими частицами. Значения объема фазы «сталь» для задания начальных условий представлены в Таблице 3, поскольку полный объем фаз является единицей.

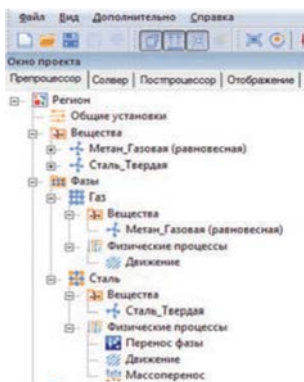


Рисунок 94 – Дерево препроцессора (вещества и фазы)

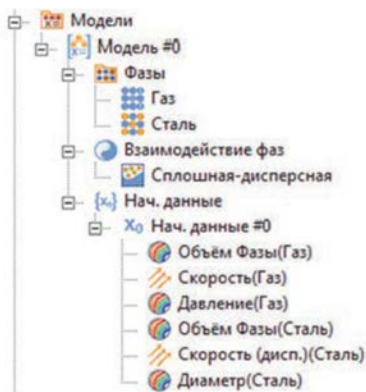


Рисунок 95 – Дерево препроцессора (модель)

Таблица 3

Значения объема фазы «сталь» для задания начальных условий

Масса абразива на входе в систему, кг	Объем фазы «сталь» в ПК FLOWVISION, м ³	Объем фазы «газ» в ПК FLOWVISION, м ³
0,25	0,00004	0,99996
0,5	0,00008	0,99992
1,0	0,00012	0,99988
10,0	0,00130	0,99870

Диаметры абразивных частиц принимались 0,1мм, 0,5мм и 1мм в соответствии с результатами исследований массы твердых частиц, задержанных фильтрами в трубопроводной обвязке газопровода.

При задании граничных условий «Стенка» были определены переменные, представленные на Рисунке 96.

При задании граничных условий «Вход» были определены переменные, представленные на Рисунке 97.

Переменные	[Количество=4]
Скорость(Газ)	Прилипание
Объём Фазы(Сталь)	Симметрия
Скорость (дисп.)(Сталь)	Проскальзывание
Диаметр(Сталь)	Симметрия

Рисунок 96 – Граничные условия «Стенка»

Переменные	[Количество=4]
Скорость(Газ)	Давление на входе
Объём Фазы(Сталь)	Значение
Скорость (дисп.)(Сталь)	Скорость частиц
Диаметр(Сталь)	Значение

Рисунок 97 – Граничные условия «Вход»

Расчет моделей исследуемых отводов при различных давлениях и диаметрах частиц

Значение давления во FLOWVISION отсчитывается от опорного давления, равного атмосферному. Значение температуры от опорной температуры 273 К. Давление на входе в систему изменялось в зависимости от рабочих параметров газопроводов, температура оставалась неизменной в течение

ние продувки. Значения давлений на входе в систему и температура представлены в Таблице 4.

Таблица 4

Задание значений давления в ПК FLOWVISION для моделей отводов

Давление в системе, МПа	Давление в ПК FLOWVISION, Па	Температура в ПК FLOWVISION, К
2,0	1899000	10
3,2	3099000	10
3,4	3299000	10
4,5	4399000	10
5,5	5399000	10
6,4	6299000	10

Объем фазы сталь и диаметры абразивных частиц устанавливались в соответствии с начальными данными, представленными выше.

При задании граничных условий «Выход» были определены переменные, представленные на Рисунке 98.

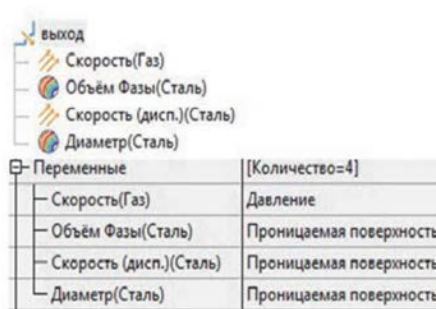


Рисунок 98 – Граничные условия «Выход»

На выходе задавали давление среды равное давлению на входе, поскольку рассматривалась закрытая система.

В папке «Начальная сетка» задавали количество расчетных ячеек по осям X, Y, Z (Рисунок 99).

При моделировании процесса движения абразивных частиц в потоке газа с определенной периодичностью выпускалась масса абразивных частиц и вместе с газом распределялась по всему объему модели в виде то-

чек с векторами до тех пор, пока не устанавливалась стабильность расчета, при которой среда заполняла всю модель по всему объему и траектории векторов скорости частиц устанавливались в направлении к выходу.

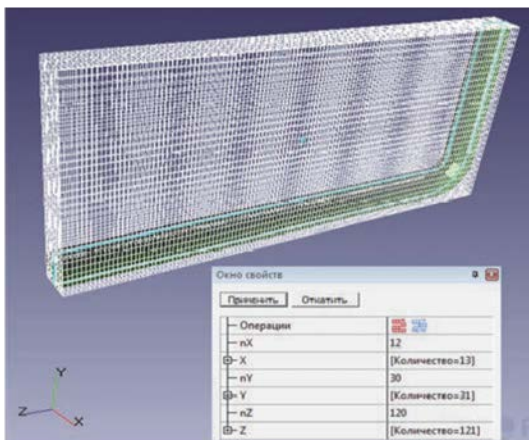


Рисунок 99 – Построение расчетной сетки в ПК FLOWVISION

На Рисунке 100 представлено распределение концентрации фазы «сталь» и векторов фазы «сталь» в процессе расчета.

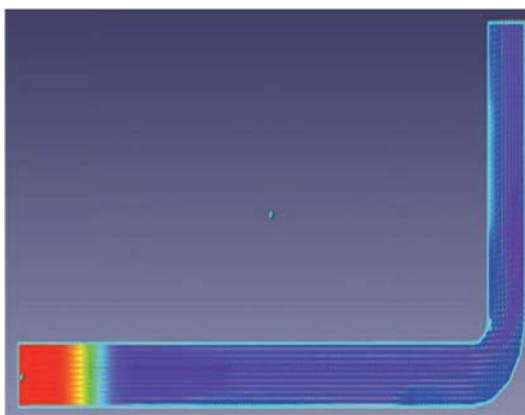


Рисунок 100 – Распределение концентрации фазы «сталь» и векторов фазы «сталь» в процессе расчета в ПК FLOWVISION

Результаты расчета исследуемых отводов при помощи программного комплекса FLOWVISION 3.09.03

После остановки расчета в постпроцессоре ПК FLOWVISION создавали слои для визуализации результатов расчета.

Слой «Изолинии» дает возможность визуализировать на экране распределение переменной, например «Концентрация» абразивных частиц, в виде разноцветных линий, соответствующих значениям концентрации частиц (см. Рисунок 100). Значение концентрации присваивается определенному цвету автоматически программой в окне легенды.

С использованием слоя «Изолинии из концентрации» определены распределения концентраций твердых частиц сферической формы (абразивных частиц) по внутренней стенке исследуемых отводов № 1–№ 4 и объем частиц (Рисунки 101–104).

Результаты расчета местоположения зоны с максимальной концентрацией налипания абразивных частиц на стенке отвода в зависимости от массы абразива и диаметра абразивных частиц представлены в Таблице 5.

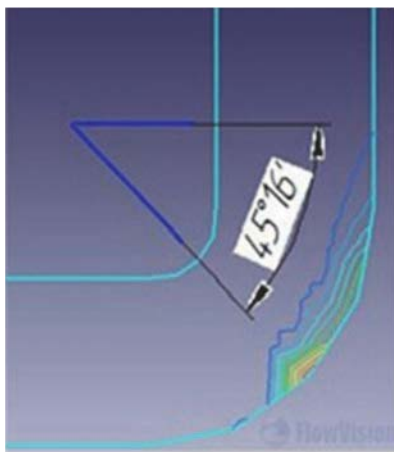


Рисунок 101 – Распределение концентрации абразива массой 0,5 кг при диаметре частиц 1,0 мм



Рисунок 102 – Распределение концентрации абразива массой 0,25 кг при диаметре частиц 1,0 мм

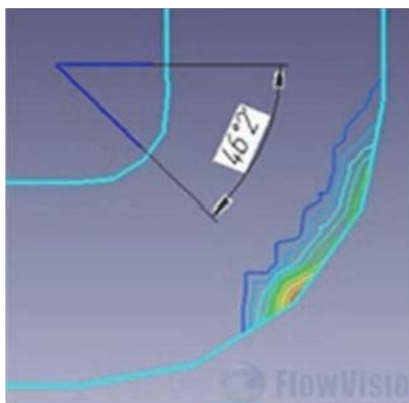


Рисунок 103 – Распределение концентрации абразива массой 0,25 кг при диаметре частиц 0,1 м

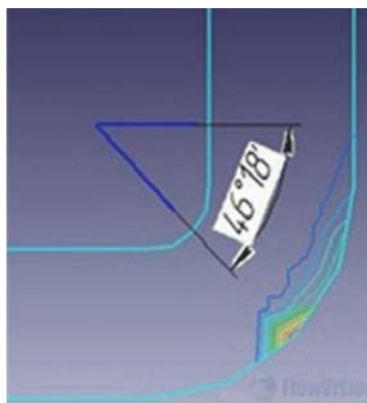


Рисунок 104 – Распределение концентрации абразива массой 10 кг при диаметре частиц 0,1 мм

Таблица 5

Угол наибольшей концентрации абразивных частиц на стенке отвода

Номер фрагмента отвода	Масса абразива, кг	Давление, МПа	Диаметр частиц, мм	Местоположение зоны с максимальной концентрацией абразивных частиц согласно расчета
1	0,50	3,4	1,0	45° 16'
2	0,25	3,2	1,0	45° 44'
3	0,25	3,2	0,1	46° 29'
4	10,0	6,4	0,1	46° 18'

Анализ данных таблицы 5 показал, что при значениях давлений на входе в модель в диапазоне 3,2–6,4 МПа местоположение зоны с максимальной концентрацией частиц практически не изменяется.

На отводе № 4 свищ находится в зоне, расположенной под углом 45° 23' (Рисунок 105). При расчете в ПК FLOWVISION область с максимальной концентрацией абразивных частиц находится под углом 46° 18', то есть погрешность расчета составляет около 2 %.

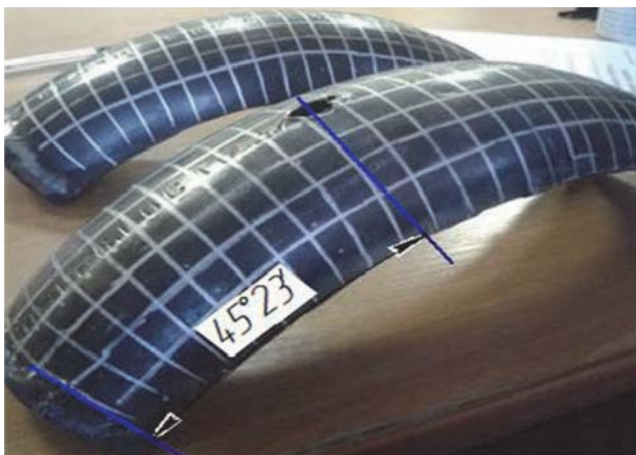


Рисунок 105 – Местоположение свища на отводе № 4

Поскольку максимальная концентрация абразивных частиц расположена в потенциальной зоне образования свища и площадь контакта этой зоны со стенкой отвода максимальна, можно сказать, что именно в этой области будет происходить износ стенки отвода, что соответствует зоне повреждения реальных объектов.

Количество абразивных частиц в области максимальной концентрации определялось по формуле:

$$N = K / V, \quad (1)$$

где K – максимальная концентрация абразивных частиц, $1/\text{м}^3$;

V – произведение максимального объема абразивных частиц и их плотности, кг.

Результаты расчета количества абразивных частиц представлены в Таблице 6.

Для определения массы срапанного металла со стенки отвода используем следующую формулу:

$$m_f = N \cdot m^0, \quad (2)$$

где m^0 – масса металла, срапанного одной частицей со стенки отвода, кг.

Результаты определения массы срапанного металла со стенки отвода представлены в Таблице 7.

Таблица 6

Результаты расчета количества абразивных частиц

Масса абразива на входе, кг	Диаметр, мм	Давление, МПа	Количество абразивных частиц, шт
0,25	0,1	3,2	9692623
	1,0		198305
0,5	1,0	3,4	488079
10,0	0,1	6,4	97615831

Таблица 7

Результаты определения массы сцарапанного металла со стенки отвода

Масса абразива на входе, кг	Диаметр, мм	Давление, МПа	Масса сцарапанного металла со стенки отвода, кг
0,25	0,1	3,2	47,2
	1,0		11,7
0,5	1,0	3,4	14,4
10,0	0,1	6,4	75,0

Для определения толщины стенки в области максимального «налипания» абразивных частиц в ПК FLOWVISION была определена зона максимального утонения.

Дерево постпроцессора содержит следующие узлы: «Виды», «Переменные», «Слои», «Объекты». Узел «Объекты» используется для редактирования объектов, служащих геометрической основой слоев.

В постпроцессоре был выбран объект эллипсоид на поверхности которого отражается цветная заливка распределения концентрации абразивных частиц. В ПК КОМПАС была определена площадь налипания максимальной концентрации абразивных частиц в виде эллипса, которая составила $0,000075 \text{ м}^2$ (Рисунок 106).

Площадь налипания максимальной концентрации абразивных частиц ($0,000075 \text{ м}^2$) является единой для всех моделей отводов, поскольку зона износа внутренней поверхности стенки отводов приходится на область налипания наибольшей концентрации абразивных частиц в расчетных мо-

делях. В Таблице 8 представлены значения толщин стенок в зоне максимального налипания абразивных частиц в зависимости от массы абразива на входе в систему, диаметров абразивных частиц и изменении рабочих давлений.

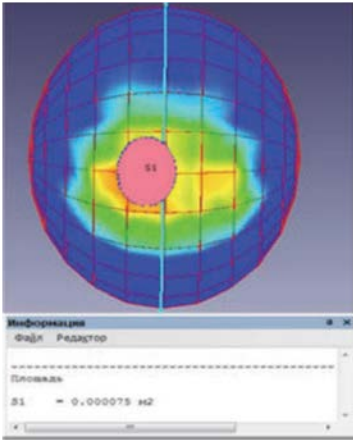


Рисунок 106 – Визуализация зоны налипания максимальной концентрации абразивных частиц площадью 0,000075 м²

Таблица 8

Значения толщин стенок в зоне максимального налипания абразивных частиц среды в газопроводе

Масса абразива на входе, кг	Диаметр, мм	Давление, МПа	Значения толщин стенок в зоне максимального налипания абразивных частиц, мм
0,25	0,1	3,2	4,96
	1,0		7,09
0,5	1,0	3,4	5,78
10,0	0,1	6,4	0,90

Учитывая количество частиц, уносящих металл со стенки отвода за одну продувку, определено количество продувок до разрушения отводов. Значения количества продувок в зависимости от рабочего давления в системе и массы абразива на входе и диаметра абразивных частиц представлены в Таблице 9.

Таблица 9

Количество продувок до разрушения отводов

Масса абразива на входе, кг	Диаметр, мм	Давление, МПа	Количество продувок отводов
0,25	0,1	3,2	100
	1,0		120
0,5	1,0	3,4	109
10,0	0,1	6,4	11

Сравнение толщин стенок фрагментов отводов №1 - № 4 после эксплуатации и результатов расчетов их моделей представлено в Таблице 10.

Таблица 10

Сравнение толщин стенок реальных объектов и расчетных моделей

Номер отвода		1	2	3	4
Экспериментальная толщина, мм		5,78	6,03	3,76	0,9
Распределение реальной толщины стенки отвода по координатам	(V;12)	5,77	6,36	3,1	1,34
	(V;13)	5,94	6,18	3,54	1,42
	(V;14)	5,92	6,08	3,16	0,22
	(V;15)	5,94	6,22	3,66	0,28
	(V;16)	5,78	6,26	5,36	1,4
	(VI;12)	5,9	6,28	3,3	1,58
	(VI;13)	5,8	6,2	3,94	0,98
	(VI;14)	5,95	6,04	3,44	0,36
	(VI;15)	6,02	6,26	4,02	0,06
	(VI;16)	5,84	6,24	5,44	1,92
Среднее значение реальной толщины стенки, мм		5,886	6,212	3,986	0,87
Погрешность расчета, %		1,8	2,9	5,6	3,5

Среднее значение реальной толщины стенки в области максимального износа для отвода № 1 составляет 5,886 мм, для отвода № 2 7,420 мм, для отвода № 3 3,986 мм, для отвода № 4 0,870 мм.

Оценка отклонения экспериментальных значений толщин стенок от реальных проводилась по формуле:

$$\Delta S = \frac{S_p - S_f}{S_p} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где S_p – значение толщины стенки реального объекта, мм;

S_f – значение толщины стенки модели, мм.

Незначительная погрешность расчета толщины стенки при моделировании абразивного износа (см. Таблицу 10) свидетельствует о верификации расчетных моделей.

Заключение

Так, при давлении 3,2МПа, массы абразива 0,25кг и диаметре частиц 0,1мм зона с максимальной концентрацией абразивных частиц расположена под углом $45^\circ 29'$, а при давлении 3,4МПа, массы абразива 0,5кг и диаметре частиц 0,5 мм зона с максимальной концентрацией абразивных частиц расположена под углом $44^\circ 59'$. Таким образом, на основании проведенных расчетов можно определить количество продувок трубопровода до достижения отбраковочной толщины стенки.

В дальнейшем планируется произвести газодинамический расчет системы моделей и получить зависимости изменения массы металла, сцарапанного со стенки отвода под механическим действием абразивных частиц при изменении давлений в системе, массы абразива на входе и диаметре абразивных частиц. Разработать методику определения массы металла, сцарапанного со стенки отвода под механическим действием абразивных частиц в зависимости от давления в системе, массы абразива на входе и диаметре абразивных частиц.

**КОНФЕРЕНЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ
SIMULIA ABAQUS
(REGIONAL USER MEETING
DASSAULT SYSTEMES SIMULIA)**

О ПРИМЕНИМОСТИ МОДАЛЬНОГО МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В РАСЧЁТАХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС ПРИ ПАДЕНИИ САМОЛЁТА И ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Коротков В.А., Иванов А.П.

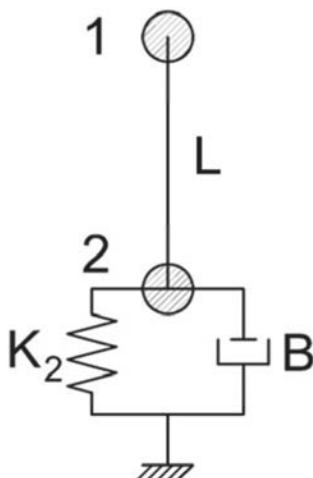
АО «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ», г. Москва, Россия

В настоящее время при обосновании безопасности АЭС при особых динамических воздействиях (сейсмика и падение самолёта - ПС) применяется как модальный метод, так и метод прямого интегрирования. Однако для систем «сооружение-основание», где волновое затухание в грунте существенно превосходит затухание в материалах строительных конструкций, модальный метод даёт определённые погрешности, причем, чем больше неодинаковость затуханий в различных элементах системы, тем погрешность больше. Это связано с погрешностью при определении модального композитного затухания, которое определяется как средневзвешенная величина, пропорциональная жесткости конечного элемента (КЭ), и эта погрешность нарастает в случае высокого волнового затухания.

Метод прямого интегрирования подобных недостатков не имеет, так как позволяет вместо опции модального композитного затухания применить «грунтовый» демпфер для решения динамической задачи. Одновременно с названным преимуществом, в методе прямого интегрирования содержится существенный недостаток – это учёт демпфирования по Релею в материалах. Дело в том, что демпфирование по Релею обеспечивает слишком консервативные результаты по сравнению с их нормативными значениями. В частности, в элементах бетона при сейсмическом воздействии уровня МРЗ, в соответствии с НП-031[1] затухание в бетоне, составляет 7%, а применяя формулу Релея, это затухание на рабочих частотах колебаний может упасть до 2 – 3%, что в свою очередь, приводит как к завышенным значениям спектральных ускорений в поэтажных спектрах ответа, так и характеристик НДС. Поэтому в настоящей статье проводится исследование на простейшей тестовой задаче и на реальной конструкции возможности использования модального метода анализа по сравнению с методом прямого интегрирования в сейсмических расчётах и при ПС.

Рассмотрим простейшую балочную конструкцию, моделирующую вертикальные колебания здания реактора, представленную на Рисунке 107. В данной конструкции здание моделируется балочным КЭ, масса которого соответствует массе реального здания. Жесткость грунта моделируется пружиной, а волновое затухание – элементом типа демпфер. При этом первая частота вертикальных колебаний рассматриваемой системы соответствует частоте вертикальных колебаний сложной КЭ системы.

Исходные данные для задачи представлены ниже.



$E = 2.1 \times 10^7 \text{ кН/м}^2$ – модуль Юнга материала балки;
 $L = 60 \text{ м}$ – длина балки;
 $F = 870 \text{ м}^2$ – площадь сечения;
 $\rho = 3.72 \text{ т/м}^3$ – плотность материала;
 $K_2 = 5 \times 10^8 \text{ кН/м}$ – жесткость грунта;
 $B = 1.4 \times 10^7 \text{ кН} \times \text{с/м}$ – волновое затухание в грунте;
 $\xi = 0.04$ – относительное затухание в материале системы.

Рисунок 107 – Модель системы «сооружение-основание»

Полную массу системы определим, как $M = \rho FL = 194184 \text{ т}$, а жесткость балочного элемента – $K_1 = EF/L = 3 \times 10^8 \text{ кН/м}$. Обозначим $K = 10^8 \text{ кН/м}$, тогда $K_1 = 3K$, а $K_2 = 5K$.

Итак, рассмотрим систему с двумя степенями свободы, показанную на Рисунке 107.

Для анализа влияния применяемых методов на результирующие кинематические параметры рассматриваемой системы, продемонстрируем по-

лучение матриц затухания системы в модальном методе и в методе прямого интегрирования.

1. Матрица жесткости и матрица масс системы имеют вид:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3K & -3K \\ -3K & 8K \end{bmatrix},$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M/2 & 0 \\ 0 & M/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}.$$

Определим вначале частоты и формы собственных колебаний следующей характеристической системы уравнений:

$$[K - \lambda M]\varphi = 0, \quad (1)$$

где λ и φ - собственное значение, равное квадрату круговой частоты собственных колебаний и собственный вектор, соответствующий форме колебаний.

С учетом вышеприведённых матриц, требование равенства нулю определителя системы (1) запишем как

$$\begin{vmatrix} 3k - \lambda m & -3k \\ -3k & 8k - \lambda m \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

Откуда легко получить:

$$(3k - \lambda m)(8k - \lambda m) - 9k^2 = 0, \text{ или}$$

$$\lambda^2 - 11\lambda\omega^2 + 15\omega^4 = 0,$$

$$\text{где } k/m = \omega^2 = 1030.$$

Решение квадратного уравнения имеет вид:

$$\lambda_1 = 1,6\omega^2 = 1650; \lambda_2 = 9,4\omega^2 = 9682,$$

или $f_1 = 6,4$ Гц и $f_2 = 15,6$ Гц. Далее определим соответствующие собственные векторы. Для этого подставив в характеристическое уравнение первое собственное значение, и умножив его на собственный вектор

$$\varphi_1 = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}, \text{ получим}$$

$$(3k - 1.6k, -3k) \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = 0.$$

$$\text{Из данного уравнения следует } \varphi_1 = U_1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0,47 \end{pmatrix}$$

Далее, используя условие нормировки, $\varphi_1^T M \varphi_1 = 1$, получим:

$$U_1^2 (1, 0,47) \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0,47 \end{pmatrix} = 1, \text{ откуда}$$

$$U_1 = \frac{1}{\sqrt{m} \cdot \sqrt{1+0,47^2}} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ и}$$

$$\varphi_1 = \begin{pmatrix} 29 \\ 14 \end{pmatrix} \cdot 10^{-4}$$

Аналогичным образом получим второй собственный вектор:

$$\varphi_2 = \begin{pmatrix} 14 \\ -29 \end{pmatrix} \cdot 10^{-4}$$

Следует отметить, что полученные собственные значения и собственные векторы хорошо согласуются с расчётами по Abaqus[2].

С учётом полученных форм собственных колебаний определим значения модального композитного затухания по следующей формуле:

$$\xi_i = \frac{M}{\phi_1^T [K] \phi_1} \frac{\phi_i^T \tilde{K} \phi_i}{\phi_i^T [K] \phi_i}, \quad i=1,2. \quad (3)$$

где $\tilde{K}$ – модифицированная матрица жесткости, при формировании которой каждый элемент умножается на коэффициент диссипации в нём. Коэффициент диссипации в элементе пружины определим как

$$\xi_2 = \frac{B}{2\sqrt{K_2 M}} \cdot 100\% = 70\%$$

В итоге матрица $\tilde{K}$ примет вид:

$$[\tilde{K}] = \begin{bmatrix} \xi_1 K_1 & -\xi_1 K_1 \\ -\xi_1 K_1 & \xi_1 K_1 + \xi K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,04 \cdot 3 & -0,04 \cdot 3 \\ -0,04 \cdot 3 & 0,04 \cdot 3 + 0,7 \cdot 5 \end{bmatrix} \cdot 10^8 =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,12 & -0,12 \\ -0,12 & 3,62 \end{bmatrix} \cdot 10^8$$

Далее определим модальное композитное затухание для различных форм колебаний:

$$\xi_1^M = \frac{(29,14)}{(29,14)} \frac{\begin{pmatrix} 0,12 & -0,12 \\ -0,12 & 3,62 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 29 \\ 14 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} 3 & -3 \\ -3 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 29 \\ 14 \end{pmatrix}} = 43\%$$

Аналогично $\xi_2^M = 32\%$.

Abaqus даёт близкие результаты для коэффициентов модального композитного затухания.

На основании вышеизложенного определим глобальные матрицы затухания системы в расчётах методом прямого интегрирования и модальным методом. Следует отметить, что в настоящем сравнительном анализе метод прямого интегрирования будет использоваться как эталонный метод и тот факт, что в общем этот метод обеспечивает консервативное решение за счёт демпфирования по Релею, в данном случае удаётся избежать. Это связано с тем, что для рассматриваемой системы с двумя степенями свободы демпфирование по Релею точно соответствует нормативным значениям в отличие от сложных систем.

Определим демпфирование по Релею для $\omega_1 = 2\pi f_1 = 40,2$ рад/сек и $\omega_2 = 2\pi f_2 = 97,97$ рад/сек и $\xi = 0,04$ следующим образом:

$$\alpha = 2\xi\omega \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2} = 2,28,$$

$$\beta = 2\xi / (\omega_1 + \omega_2) = 0,00058,$$

$$C = \alpha M + \beta K = 2,28 \begin{bmatrix} 97092 & 0 \\ 0 & 97092 \end{bmatrix} + 0,00058 \begin{bmatrix} 3 & -3 \\ -3 & 8 \end{bmatrix} \cdot 10^8 =$$

$$= \begin{bmatrix} 3,9 & -1,74 \\ -1,74 & 6,85 \end{bmatrix} \cdot 10^5$$

Полное демпфирование получим, добавив к глобальной матрицы материального демпфирования по Релею сосредоточенный демпфер, т.е.

$$C = \begin{pmatrix} 3,9 & -1,74 \\ -1,74 & 6,85 \end{pmatrix} \cdot 10^5 + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1,4 \cdot 10^7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,9 & -1,74 \\ -1,74 & 146,9 \end{pmatrix} \cdot 10^5 \quad (4)$$

Для определения глобальной матрицы модального затухания используем следующую формулу

$$C = 2M\Phi\Omega Z(M\Phi)^T, \quad (5)$$

где M – матрица массы,

Φ – матрица, состоящая из форм колебаний по столбцам,

Ω – диагональная матрица, состоящая из частот собственных колебаний (рад/сек),

Z – диагональная матрица, состоящая из значений модального композитного затухания. Перечисленные матрицы имеют следующий вид:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 \\ 0 & \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40,2 & 0 \\ 0 & 97,97 \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} \xi_1^M & 0 \\ 0 & \xi_2^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,43 & 0 \\ 0 & 0,32 \end{bmatrix}$$

$$M\Phi = (M\Phi)^T = \begin{bmatrix} 97092 & 0 \\ 0 & 97092 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 29 & 14 \\ 14 & -29 \end{bmatrix} \cdot 10^{-4} = \begin{bmatrix} 28157 & 13593 \\ 13593 & -28157 \end{bmatrix} \cdot 10^{-2}$$

Производя умножение матриц по формуле (5), получим:

$$C = \begin{bmatrix} 39 & -10,6 \\ -10,6 & 56 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \quad (6)$$

Из сравнения матрицы затухания для метода прямого интегрирования (эталонное решение) и матрицы затухания в модальном методе (формулы 4 и 6) видно, что диагональный член $C(1,1)$ в первом случае существенно меньше соответствующего коэффициента во втором случае и, наоборот, для коэффициента $C(2,2)$. Это приводит к уменьшению результатов расчё-

та ускорений и перемещений в точке 1 модальным методом по сравнению с методом прямого интегрирования. Сравнение результатов расчёта в точке 2 приводит к противоположному эффекту.

Таблица 1

Результаты расчета для сейсмического теста $\left(\frac{B}{B = 2 \sqrt{K_2 M}} \right)$

$\bar{B}$	0	14%	28%	35%	42%	70%
B	0	$0,28 \cdot 10^7$	$0,56 \cdot 10^7$	$0,70 \cdot 10^7$	$0,84 \cdot 10^7$	$1,40 \cdot 10^7$
Прямое интегрирование	$a_{\max}^1 = 15 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 6,3 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 4,0 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 3,5 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 3,2 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 2.6 \text{ м/с}^2$ $a_{\max}^2 = 1.2 \text{ м/с}^2$
модальный метод	$a_{\max}^1 = 15 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 6,3 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 3,5 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 2,9 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 2,5 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 1.7 \text{ м/с}^2$ $a_{\max}^2 = 1.3 \text{ м/с}^2$
Сим-архитектура	$a_{\max}^1 = 15 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 6,3 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 4,0 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 3,5 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 3,2 \text{ м/с}^2$	$a_{\max}^1 = 2.6 \text{ м/с}^2$
модал. метод с 20% ограничением						$a_{\max}^1 = 3.1 \text{ м/с}^2$ $a_{\max}^2 = 1.8 \text{ м/с}^2$
Мо-дальное компо-зитное демп-фирование	4%	9,7%	17,6%	21,6%	25,6%	41,5%

Далее выполним расчёты ускорений в точке 1 и в точке 2 по ПК Abaqus при гармоническом воздействии с единичной амплитудой и с частотой колебаний, равной 6,4 Гц. Для обеспечения условия резонанса учитывалось 50 циклов воздействия, которое прикладывалось в опорной точке. Результаты расчёта приведены в Таблице 1. В приведённой таблице представлены результаты расчёта системы без демпфера, и далее с учётом постепенного нарастания волнового демпфирования до 70% включительно.

В представленной Таблице 1 даны максимальные ускорения в точках 1 и 2, полученные в расчётах методом прямого интегрирования, модальным методом и Sim – архитектурой. Также в таблице представлены расчёты модальным методом с 20% ограничением модального композитного демпфирования, начиная с момента его превышения этой величины.

На Рисунке 108 представлен график зависимости максимального ускорения от модального композитного затухания в системе.

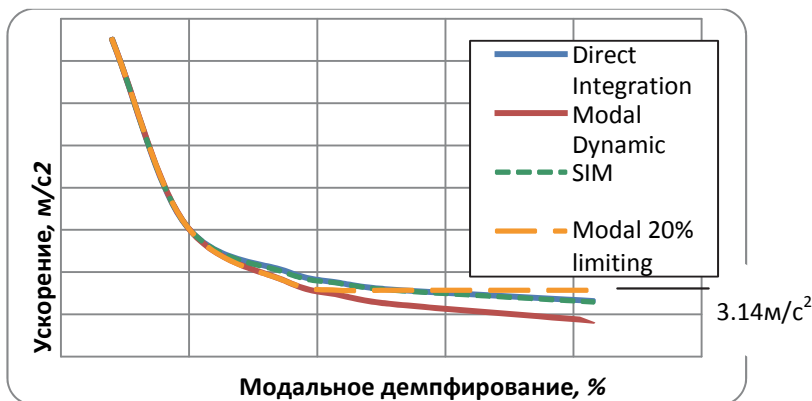


Рисунок 108 – Зависимость максимального ускорения от модального композитного затухания

В Таблице 2 для данной задачи получены максимальные ускорения в точках при ПС – Boeing 747 со скоростью 200 м/с. Удар самолёта произошел в точке 1. График, характеризующий воздействие самолета представлен на Рисунке 109.

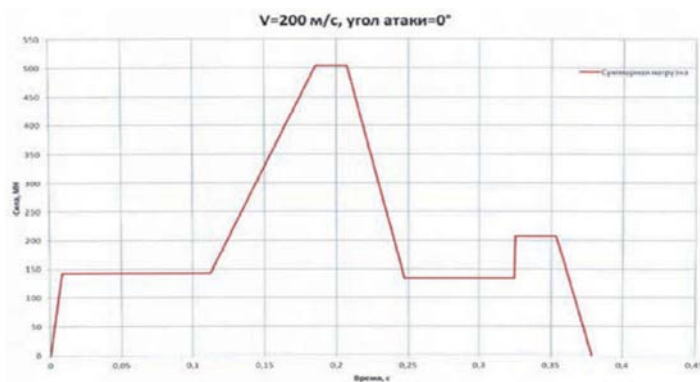


Рисунок 109 – Воздействие самолёта Boeing 747

Таблица 2

Результаты расчета при ПС ($\bar{B} = 70\%$)

	Метод расчета	Ускорение
$a_{\max}^1$	прямой метод	2,6 м/с ²
	модальный метод	1,8 м/с ²
	модальный метод с 20%-м ограничением	2,8 м/с ²
$a_{\max}^2$	прямой метод	0,86 м/с ²
	модальный метод	0,79 м/с ²
	модальный метод с 20%-м ограничением	1,40 м/с ²

Сравнительный анализ результатов показывает, что расчёты методом прямого интегрирования почти идеально совпадают с Sim-архитектурой во всём диапазоне изменения демпфирования. Результаты расчёта методом прямого интегрирования и модальным методом вначале (до модального демпфирования 12%) также идеально совпадают. Но, далее, на больших значениях модального композитного затухания, модальный метод имеет

тенденцию к занижению результатов; причём, чем больше демпфирование, тем погрешность больше, и при реалистической величине волнового демпфирования – 70% – это различие составляет 57%. Как упоминалось выше, причина такого различия состоит в неточности расчёта модального композитного затухания за счёт резкого скачка затухания в различных частях системы. Этот недостаток существует только в модальном методе. Поэтому, как видно из теста (и это не противоречит ASCE 4-98 [3]), нужно вводить 20% ограничение, что даёт консервативный результат по сравнению с методом прямого интегрирования, как при сейсмическом расчёте, так и при ПС.

В качестве второй задачи рассмотрим расчёт спектров ответа в реалистическом здании коробчатого типа, представленном на Рисунке 110, при ПС.

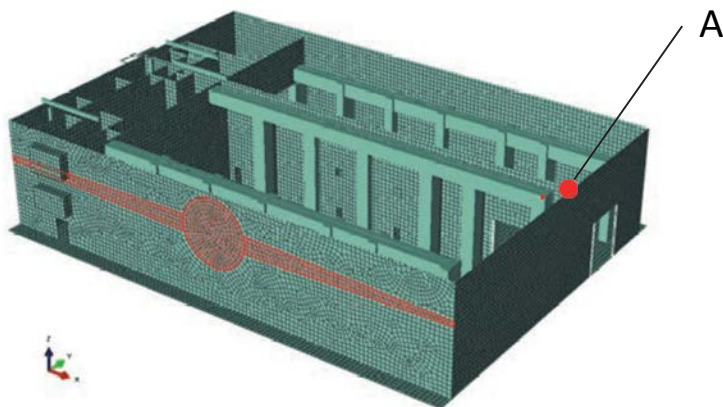
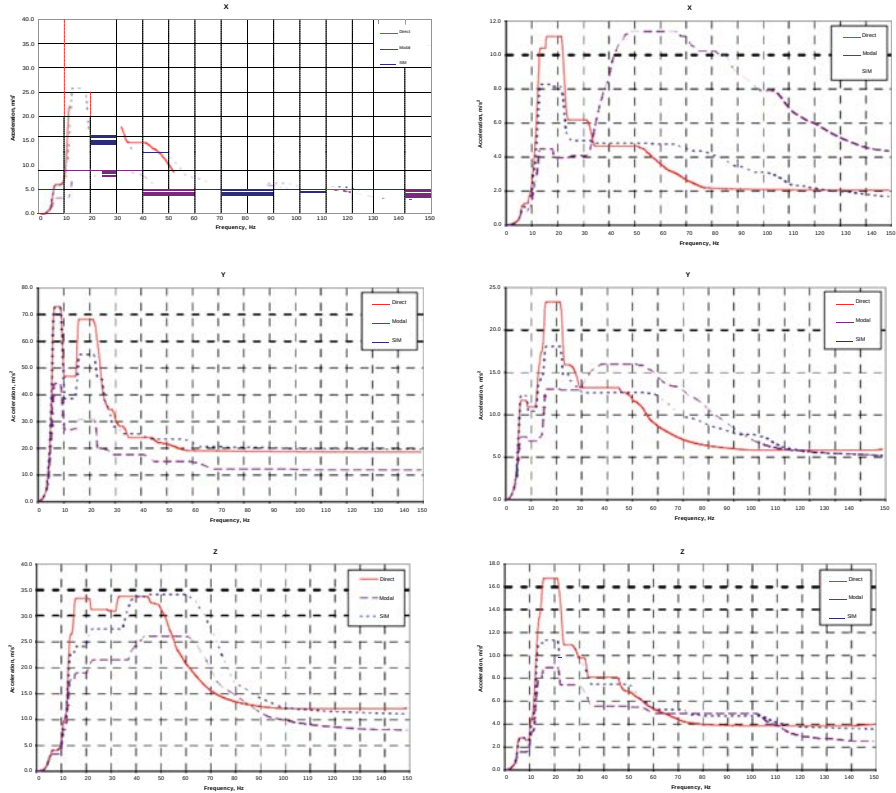


Рисунок 110 – КЭ модель здания с указанием пятна удара. В точке А определяется спектр ответа

На этом рисунке представлена КЭ модель с указанием места удара. Эквивалентные жесткости и демпфирование в грунте, учитывающийся с использованием грунтового параллелепипеда, затем распределялись по подошве фундамента здания (жесткости по седловидному закону, а демпфирования – равномерно). В расчёте приняты следующие интегральные значения волнового затухания (скорректированные): $b_x=45\%$, $b_y=44\%$, $b_z=33\%$. Демпфирование в бетоне составляло 7%. Материальное демпфирование по Релею определялось из условия, что нижнее и верхнее значения частот, представляющие интерес, составили 4Гц и 100Гц. Шаг интегрирования по

времени составил 0.001с в модальном методе, а в методе прямого интегрирования расчёт проводился с переменным шагом интегрирования, величина которого не превосходила 0.001с. Количество учитываемых тонов собственных колебаний в модальном методе бралось до 100Гц.

На Рисунке 111 представлены спектры ответа в расчётах модальным методом при 20%-м ограничении модального композитного затухания, спектры, рассчитанные методом прямого интегрирования и спектры, определённые с помощью SIM – архитектуры в верхней точке колонны, а также на фундаментной плите у основания этой колонны.



Сравнение спектров ответа ($\zeta=5\%$)
в точке A

Сравнение спектров ответа ($\zeta=5\%$)
на фундаментной плите у основания
колонны

Рисунок 111 – Результирующие спектры ответа

Из сравнения спектров ответа в верхней точке видно, что модальный метод даёт в целом существенно более низкие значения спектральных ускорений, что соответствует выводам тестовой задачи. Это связано с консерватизмом в расчётах методом прямого интегрирования. Сравнение спектров в нижней точке показывает, что метод прямого интегрирования на высоких частотах даёт заниженные результаты, а на низких частотах - наоборот. Это связано с влиянием двух факторов на фундаменте для метода прямого интегрирования: непосредственное влияние грунтового демпфера приводит к снижению спектральных ускорений, а демпфирование по Релею – к повышению по сравнению с модальным методом.

SIM – архитектура в целом даёт результаты, осреднённые между модальным и прямым методами. Модальный метод приемлем при проведении линейных динамических расчётов строительных конструкций АЭС при ПС, в случае учёта, в системе числа частот до 100Гц, и, при 20%-ом ограничении величины модального композитного затухания. Данный метод обеспечивает в большинстве расчётов существенно более низкие значения спектральных ускорений на отметках расположения оборудования, чем метод прямого интегрирования.

Основные определения:

1. Система «сооружение-основание» – расчётная модель, включающая конструкцию здания и грунтовое основание;
2. «Грунтовой демпфер» - вязкий демпфер, характеризующий величину волнового затухания в грунте при колебаниях здания (взят из ASCE4-98);
3. SIM – архитектура – новая архитектура программы Abaqus, включающая полностью заполненную спроектированную на базисе собственных векторов матрицу затухания в системе «сооружение-основание» при выполнении модального расчёта. Ранее в модальном расчёте такая матрица имела диагональный вид.

Список литературы

1. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Москва, 2002.
2. Abaqus V13.1, Dassault Systemes SIMULIA CORP.
3. ASCE4-98. ASCE STANDARD. Seismic analysis of safety related nuclear structures and commentary. Approval 1992.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ ФОРМ «НЕПРАВИЛЬНОГО» ГЕКСАЭДРА

Романов А.В.

АО «Атомэнергoproject», г. Москва, Россия

Конструкции железобетонных защитных оболочек, выполненных за последние десятилетия, проектируемые в России и за рубежом, исходя из технико-экономических показателей и критериев безопасности, являются предварительно напряженными железобетонными, со стальной герметизирующей облицовкой (Рисунки 112, 113). Данные конструкции относятся к особо ответственному, подлежащим проверке эксплуатационной пригодности и контролю на всём жизненном цикле (период преднапряжения, прямо-сдаточных испытаний и период эксплуатации энергоблока). Или, пользуясь нормативной терминологией и определениями: защитные оболочки реакторных отделений энергоблоков АЭС относятся к сооружениям 2-го класса безопасности по ПНАЭ Г-1-011-89/97, 1-й категории сейсмостойкости по НП-031-01 и ответственности за радиационную и ядерную безопасность, обеспечение функционирования, размещаемого в них оборудования – по ПИН АЭ-5.6 [14]. Кроме того, согласно ОПБ-88/97 [12] системы и элементы атомных станций (АС), важные для безопасности, должны проходить прямую и полную проверку на соответствие проектным характеристикам при вводе в эксплуатацию, после ремонта и периодически в течение всего срока службы АС.

Таким образом, преднапряжение защитной оболочки – является основной проектной характеристикой, являющейся важным критерием ее эксплуатационной пригодности, требуемый уровень которого устанавливается расчётом. А контроль уровня преднапряжения, осуществляется двумя независимыми методами: «прямым» методом и «косвенным». «Прямой» метод основан на периодическом измерении усилий натяжения армоканатов СПЗО на их тяжных концах, с использованием гидродомкратов системы «liftoff». «Косвенный» метод, основан на регулярном измерении параметров НДС оболочки при помощи информационно-измерительной систе-

мы автоматизированного контроля (АСК НДС) в строительный период и период эксплуатации энергоблока АЭС.

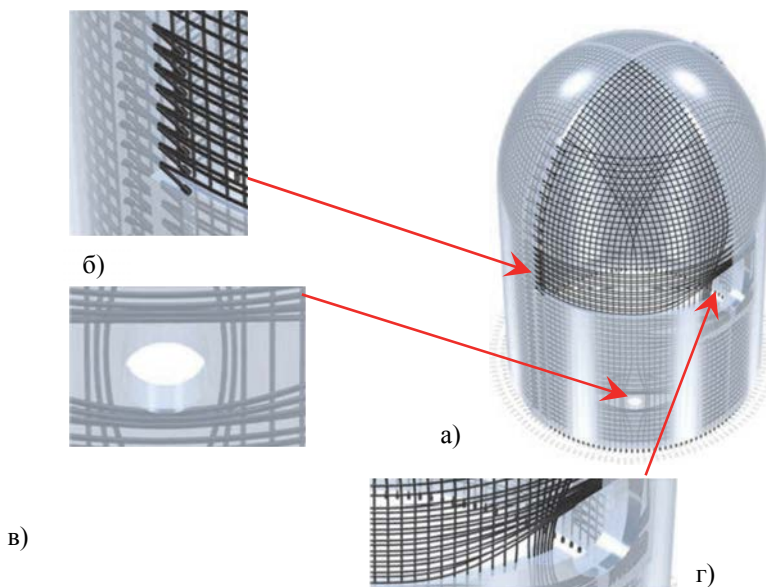


Рисунок 112 – Трехмерная модель защитной оболочки АЭС-2006. Перспектива (а); анкерные пиястры СПЗО (б); технологический шлюз (в); транспортный шлюз (г)

В настоящее время, для расчетного обоснования НДС и минимального уровня обжатия, с учётом требуемых проектных нагрузок и воздействий, используется специализированный расчетный комплекс «Precont Cobef», Франция. Данный программный комплекс позволяет проводить расчеты и оценку минимального уровня обжатия СПЗО в упругой стадии, без учёта влияния реологических факторов, оказывающих существенное влияние на НДС в период эксплуатации контеймента. Это обстоятельство явилось основным мотивом разработки метода и реализации программного комплекса, позволяющего в ближайшей перспективе учесть реологические факторы поведения СПЗО, проскальзывание каната, и в интерактивном режиме, при нерегулярной пространственной трассировке канатов, выпол-

нять моделирование и расчет объемного напряженно-деформированного состояния контаймента.



Рисунок 113 – Проектное расположение армоканатов и анкеровка СПЗО защитной оболочки в плиту на отметке +0,000 [16]

Итак, рассмотрим моделирование СПЗО, с использованием метода интерполяции усилий самонапряженных канатов на узлы конечно элементной модели оболочки при помощи функций форм «неправильных» гексаэдров.

Рассмотрим призму или гексаэдр неправильной формы в некоторой декартовой системе координат. Для подобной призмы собственные грани не являются «правильными», т.е. их вершины не лежат в одной плоскости. Для вывода функций форм воспользуемся приемом преобразования призмы в куб посредством представления призмы в нормализованной системе координат, а взаимосвязь между нормализованной и принятой системой координат выразим через зависимость функций форм (Рисунок 114) [3]:

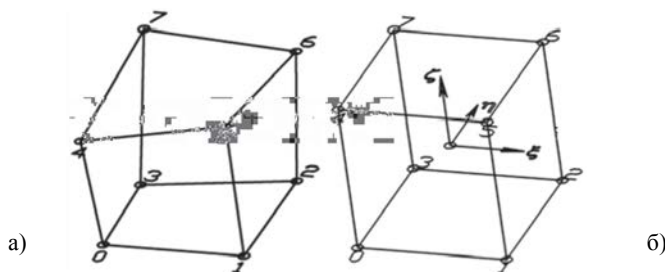


Рисунок 114 – Призма неправильной формы в принятой (а) и нормализованной (б) системе координат

$$\begin{aligned} x &= N_0(\zeta, r), ()X_0 + N_1(\zeta, r), ()X_1 + N_2(\zeta, r), ()X_2 + \dots + N_7(\zeta, r), ()X_7 \\ y &= N_0(\zeta, r), ()Y_0 + N_1(\zeta, r), ()Y_1 + N_2(\zeta, r), ()Y_2 + \dots + N_7(\zeta, r), ()Y_7 \quad (5) \\ z &= N_0(\zeta, r), ()Z_0 + N_1(\zeta, r), ()Z_1 + N_2(\zeta, r), ()Z_2 + \dots + N_7(\zeta, r), ()Z_7 \end{aligned}$$

Или в матричной форме:

$$\begin{matrix} N_0(\zeta, r), ()^T & X_0 & Y_0 & Z_0 \\ N_1(\zeta, r), () & X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_7(\zeta, r), () & X_7 & Y_7 & Z_7 \end{matrix} = [x \quad y \quad z] \quad (6)$$

Здесь, $\begin{matrix} N_0(\zeta, r), ()^T \\ N_1(\zeta, r), () \\ \vdots \\ N_7(\zeta, r), () \end{matrix}$ – матрица функций форм призмы в нормализованной системе координат ξ, η, ζ ;

$\begin{matrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_7 & Y_7 & Z_7 \end{matrix}$ – матрица вершин неправильной призмы в принятой системе координат;

$[x \quad y \quad z]$ – координаты принятой системы, соответствующие координатам ξ, η, ζ в нормализованной системе.

Параметры координат ξ, η, ζ изменяются в интервале от -1 до +1:

$$\begin{aligned} \xi &\in [-1; +1] \\ \eta &\in [-1; +1] \quad (7) \\ \zeta &\in [-1; +1] \end{aligned}$$

Определим соотношения функций форм через координаты узлов на границе элемента (Рисунок 115) исследуя следующую зависимость:

$$N_i = \frac{1}{8} (1 \pm \xi)(1 \pm \eta)(1 \pm \zeta), i = 0 \dots 7 \quad (8)$$

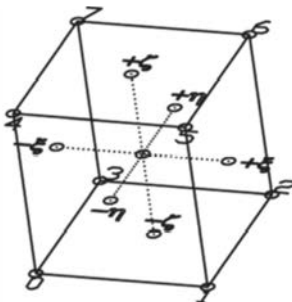


Рисунок 115 – К определению соотношений функций форм через координаты узлов на границе элемента

Рассмотрим узел 0 нормализованной призмы. Он имеет координаты $\xi = -1, \eta = -1, \zeta = -1$. Здесь функция формы, принимает значение 1. Следовательно, для узла 0 функция формы имеет вид:

$$N_0 = \frac{1}{8} (1 - (-1))(1 - (-1))(1 - (-1)) = \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \quad (9)$$

Учитывая выражения (8) и (9) определим соотношения функций форм

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta); \\ N_1 &= \frac{1}{8} (1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta); \\ N_2 &= \frac{1}{8} (1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta); \\ N_3 &= \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta); \\ N_4 &= \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta); \\ N_5 &= \frac{1}{8} (1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta); \\ N_6 &= \frac{1}{8} (1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta); \\ N_7 &= \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta); \end{aligned} \quad (10)$$

для остальных узлов:

Поставим задачу так, что нам необходимо найти соотношения $(\zeta, r]$, (в нормализованной системе координат, которым будут соответствовать координаты x, y, z в принятой системе. Тогда, учитывая зависимости (6) и (10), для нахождения ξ, η, ζ воспользуемся следующим выражением:

$$[N(\zeta, r], ()^T [X]^T - [x] = 0$$

$$\frac{1}{8} \begin{pmatrix} (1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta) \\ (1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta) \\ \vdots \\ (1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_7 & Y_7 & Z_7 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = 0 \quad (11)$$

Выражение (11) определяет систему нелинейных уравнений 3-го порядка, для решения которых относительно $(\zeta, r]$, (воспользуемся численным итерационным методом Ньютона, обладающим достаточно быстрой сходимостью [6].

Для удобства, в системе нелинейных уравнений (11) введем дополнительные обозначения:

$$\frac{1}{8} \begin{pmatrix} (1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta) \\ (1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta) \\ \vdots \\ (1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_7 & Y_7 & Z_7 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_x(\zeta, r], () \\ \Phi_y(\zeta, r], () \\ \Phi_z(\zeta, r], () \end{pmatrix}$$

$$= [\Phi(\zeta, r], () \quad (12)$$

Здесь $[\Phi(\zeta, r], ()$ вектор столбец функций, определяющих соотношения между координатами $(\zeta, r]$, (нормализованными координатами x, y, z принятой системы, соответственно.

Пусть приближённые значения неизвестных $(\zeta, r]$, (системы (11) полученные на предыдущей итерации, равны соответственно $\xi^{(k-1)}, \eta^{(k-1)}, \zeta^{(k-1)}$. Задача состоит в нахождении приращений (поправок) к этим значениям $\Delta\zeta, \Delta r]$, $\Delta()$, благодаря которым следующее приближение к решению системы уравнений (11) запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \zeta^{(k)} &= \zeta^{(k-1)} + \Delta\zeta \\ \eta^{(k)} &= \eta^{(k-1)} + \Delta\eta \quad (13) \\ \zeta^{(k)} &= \zeta^{(k-1)} + \Delta\zeta \end{aligned}$$

Проведем разложение левых частей уравнений (11) в ряд Тейлора, ограничиваясь лишь линейными членами относительно приращений, учитывая введенные обозначения (12):

$$\begin{aligned} \Phi(\xi^{(k)}, \eta^{(k)}, \zeta^{(k)}) &\approx \Phi_x + \frac{\partial \Phi_x}{\partial \xi} \Delta\zeta + \frac{\partial \Phi_x}{\partial \eta} \Delta\eta + \frac{\partial \Phi_x}{\partial \zeta} \Delta\zeta \\ \Phi(\xi^{(k)}, \eta^{(k)}, \zeta^{(k)}) &\approx \Phi_y + \frac{\partial \Phi_y}{\partial \xi} \Delta\zeta + \frac{\partial \Phi_y}{\partial \eta} \Delta\eta + \frac{\partial \Phi_y}{\partial \zeta} \Delta\zeta \quad (14) \\ \Phi(\xi^{(k)}, \eta^{(k)}, \zeta^{(k)}) &\approx \Phi_z + \frac{\partial \Phi_z}{\partial \xi} \Delta\zeta + \frac{\partial \Phi_z}{\partial \eta} \Delta\eta + \frac{\partial \Phi_z}{\partial \zeta} \Delta\zeta \end{aligned}$$

В правых частях соотношений (14) значения Φ_x, Φ_y, Φ_z и их производные вычисляются в точке $\xi^{(k-1)}, \eta^{(k-1)}, \zeta^{(k-1)}$. Поскольку в соответствие с (11) левые части (14) должны обращаться в нуль, приравняем нулю и правые части, т.е. найдем новое приближение из условия равенства нулю разложений функций Φ_x, Φ_y, Φ_z . Получим следующую систему алгебраических уравнений относительно приращений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_x}{\partial \xi} \Delta\zeta + \frac{\partial \Phi_x}{\partial \eta} \Delta\eta + \frac{\partial \Phi_x}{\partial \zeta} \Delta\zeta &= -\Phi_x \\ \frac{\partial \Phi_y}{\partial \xi} \Delta\zeta + \frac{\partial \Phi_y}{\partial \eta} \Delta\eta + \frac{\partial \Phi_y}{\partial \zeta} \Delta\zeta &= -\Phi_y \quad (15) \\ \frac{\partial \Phi_z}{\partial \xi} \Delta\zeta + \frac{\partial \Phi_z}{\partial \eta} \Delta\eta + \frac{\partial \Phi_z}{\partial \zeta} \Delta\zeta &= -\Phi_z \end{aligned}$$

Определителем системы (15) является якобиан, а матрица из частных производных, есть матрица Якоби:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_x}{\partial \xi} & \frac{\partial \Phi_x}{\partial \eta} & \frac{\partial \Phi_x}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial \Phi_y}{\partial \xi} & \frac{\partial \Phi_y}{\partial \eta} & \frac{\partial \Phi_y}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial \Phi_z}{\partial \xi} & \frac{\partial \Phi_z}{\partial \eta} & \frac{\partial \Phi_z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Запишем уравнения (15) в матричной форме, учитывая определения (15)(16):

$$\begin{pmatrix} \frac{d\Phi_x}{d\xi} & \frac{d\Phi_x}{d\eta} & \frac{d\Phi_x}{d\zeta} \\ \frac{d\Phi_y}{d\xi} & \frac{d\Phi_y}{d\eta} & \frac{d\Phi_y}{d\zeta} \\ \frac{d\Phi_z}{d\xi} & \frac{d\Phi_z}{d\eta} & \frac{d\Phi_z}{d\zeta} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\xi \\ \Delta\eta \\ \Delta\zeta \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \Phi_x \\ \Phi_y \\ \Phi_z \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$[\Phi] \cdot [\Xi] = [\Phi]$$

Здесь, $[\Xi] = \begin{pmatrix} \Delta\xi \\ \Delta\eta \\ \Delta\zeta \end{pmatrix}$ – вектор столбец приращений.

Откуда и выразим искомые приращения:

$$[\Xi] = -[\Phi]^{-1} \cdot [\Phi] \quad (18)$$

Таким образом, итерационный процесс решения системы нелинейных уравнений (11) методом Ньютона состоит в определении приращений $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$ к значениям неизвестных на каждой итерации посредством решения систем (15) и (17). Счет прекращается при выполнении условия:

$$|\Phi(\xi, \eta, \zeta)| < E \quad (19)$$

Учитывая, что интервал изменения параметров находится в пределах от -1 до +1 в соответствии с определением (7), то на первом этапе итерационного процесса примем следующие начальные условия:

$$\begin{aligned} \xi^{(0)} &= 0 \\ \eta^{(0)} &= 0 \\ \zeta^{(0)} &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Определив значения параметров (ξ, η, ζ) при решении системы нелинейных уравнений (11) относительно рассматриваемой точки (точки узла каната) мы получаем значения функций форм из выражений (10) для каждого из 8-ми узлов призмы неправильной формы в принятой системе координат. Таким образом, поставленная задача решена, и для интерполяции узловых усилий преднатянутого каната на узлы гексаэдра неправильной формы достаточно воспользоваться выражением:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \cdot [N_0 \dots N_7] = \begin{pmatrix} f_{x0} & \dots & f_{x7} \\ f_{y0} & \dots & f_{y7} \\ f_{z0} & \dots & f_{z7} \end{pmatrix} \quad (24)$$

Здесь, $\begin{matrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{matrix}$ – вектор столбец силы каната, определяемый в соответствии с выражением (2);

$f_{x0} \dots f_{x7}$

$f_{y0} \dots f_{y7}$ – значения интерполированных векторов сил в узлах

$f_{z0} \dots f_{z7}$

«неправильного» гексаэдра от усилий каната.

Как было уже отмечено раньше, описанный в настоящей работе метод интерполяции усилий реализован в программных модулях, посредством которых предполагается проводить расчеты минимального уровня обжатия гермооболочек реакторных зданий АЭС и определять эксплуатационную пригодность конструкции в целом.

Работу программных модулей по моделированию СПЗО и оценке уровня обжатия железобетонной конструкции оболочки проиллюстрируем на двух примерах. При этом, расчёт НДС выполнен с использованием ПК ABAQUS:

- пример тестовой конечно-элементной модели железобетонной оболочки состоящей из 45948 конечных элементов гексаэдров с тремя горизонтальными преднапряженными канатами на отметках +12,400; +26,400; +30,600 (Рисунки 116-118);

- пример масштабной модели железобетонной оболочки состоящей из 186637 конечных элементов гексаэдров и системы из 128 преднапряженных армоканатов на базе проекта АЭС-2006 (является прототипом проектов НВО АЭС-2, базовых проектов АЭС ВВЭР ТОИ (Россия), АЭС Аккую (Турция) (Рисунки 119, 120) [16].

Модель канатов и оболочки имеют следующие физико-механические характеристики:

- осредненный модуль упругости железобетона $E = 39000$ МПа;
- коэффициент поперечной деформации (Пуассона) $\nu = 0.2$;
- коэффициент трения по длине каната $\omega = 0.001$;
- коэффициент учета трения по углу $f = 0.05$;
- модуль упругости каната $E_c = 195000$ МПа;
- усилие натяжения каната на анкере $N = 11.4$ МН(1162тс);
- осадка армопучков на цангах анкера $\Delta l = 0.006$ м.

На Рисунке 116 представлена модель из 45948 конечных элементов гексаэдров и 3-х кольцевых канатов на отметках +12,400м; +26,400м; +30,600м с радиусом трассировки по цилиндрической поверхности R22,85м. Анализ напряженно деформированного состояния двух методов (Рисунок 117) не выявляет существенных отличий по напряжениям. В обоих случаях напряжения (кроме зон анкеровки) не превышают 6 МПа (для 3-х тестовых канатов). Аналогичная ситуация и с деформациями. Что касается узловых сил (Рисунок 118, (а) и (б)) то изополя наглядно иллюстрируют равномерность распределения усилий методом функций форм «неправильных» гексаэдров, изополя не содержат скачков или «ряби» (Рисунок 118, а). А что же касается метода интерполяции функциями форм тетраэдров, то изополя узловых сил скачкообразны (содержат «рябь»).

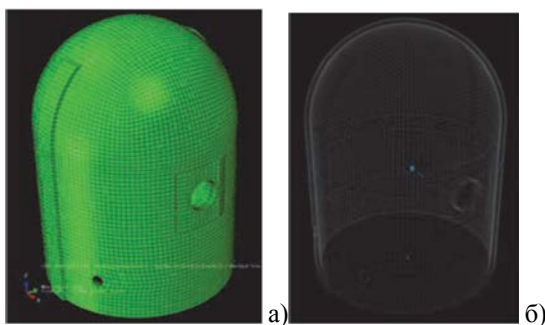


Рисунок 116 – Конечно-элементная разбивка оболочки АЭС-2006 на 45948 солидов C3D8 (а) и сборка моделей (оболочка + канаты) с использованием программных модулей (б)

При этом на пилястрах модели (в зоне анкеровки канатов) так же видно, что наибольшие значения узловых сил показывает метод функций форм тетраэдров. Это и очевидно, потому как интерполяция усилий происходит по более грубой схеме, по 4-м узлам вместо 8-ми.

Таким образом, данный пример иллюстрирует более равномерное распределения усилий функциями форм «неправильной» призмы и доказывает совершенство подхода в отличие от метода интерполяции узловых усилий функциями форм тетраэдров. Более того на практике установлено, что скорость работы метода интерполяции функциями форм «неправильной» призмы на 30% быстрее своего аналога.

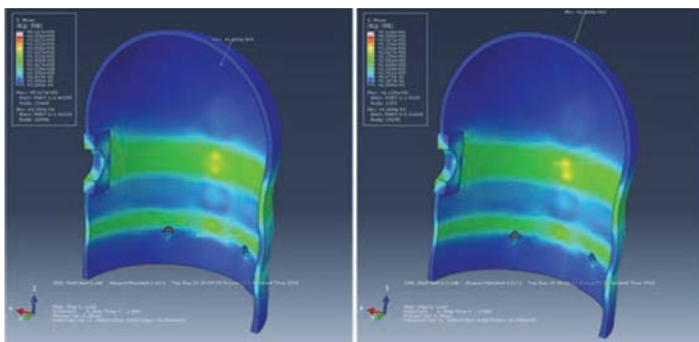


Рисунок 117 – Изополя напряжений Mises, в МПа, полученных методами моделирования канатов с интерполяцией функциями форм «неправильных» гексаэдров (а) и функциями форм тетраэдров (б)

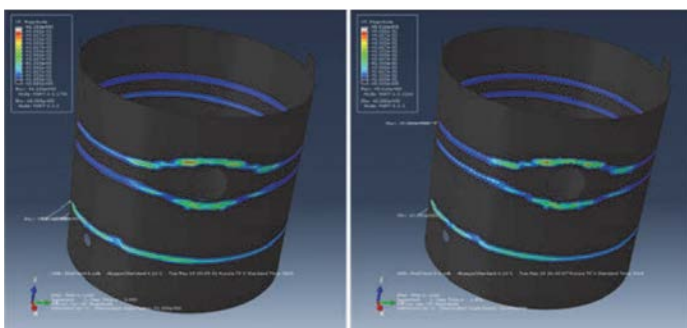


Рисунок 118 – Иллюстрация распределения узловых сил CF, в МН функциями форм гексаэдров (с плавным распределением, «ряби» нет) (а) и функциями форм тетраэдров (на изополях есть «рябь»)

В настоящее время, при анализе напряжённо-деформируемого состояния контейнента приходится сталкиваться с рядом систематических расхождений натурных данных и результатов расчёта, зависящих от ряда действительных процессов поведения конструкции. Например, эффект «проскальзывания» канатов и пластического поведения железобетона являются ключевыми факторами, учёт которых определяет точность поведения модели. Данные вопросы являются в достаточной степени актуальными и требуют особого внимания. По этому, дальнейшие публикации будут по-

связаны, исследованию и учёту эффекта «проскальзывания» канатов, ползучести бетона и других реологических факторов, отражающих реальную механику поведения контаймента.

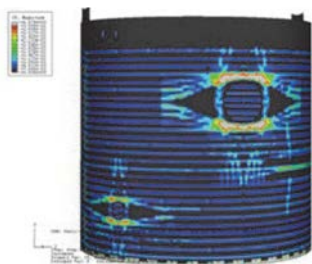


Рисунок 119 – Изополя узловых векторов сил CF, MN с цилиндрическим сечением оболочки по радиусу 22.60м

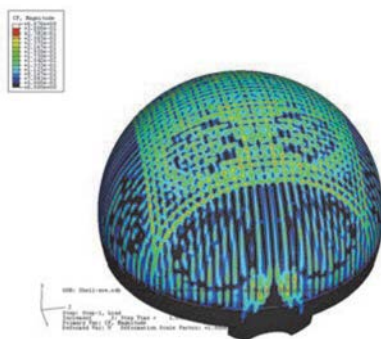


Рисунок 120 – Изополя узловых векторов сил CF, MN в купольной части защитной оболочки с радиусом сечения сферы 22.40м

Список литературы

1. *О. Зенкевич, И. Чанг.* Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред./Пер. с англ. О.Троицкого, С.Соловьева. – М.: «Недра». 1974. 240 с.
2. *О. Зенкевич.* Метод конечных элементов в технике. / Пер. с англ. Б. Е. Победри. – М.: Мир. 1975. 543 с.
3. *Л. Сегерлинд.* Применение метода конечных элементов. / Пер. с англ. А. А. Шестакова; Под ред. Б. Е. Победри. – М.: Мир. 1979. 395 с.

4. *Ф. Леонгардт*. Предварительно напряженный железобетон. / Пер. с нем. В. Н. Гаранина. – М.: Стройиздат. 1983. 246 с.
5. *К. Бате, Е. Вилсон*. Численные методы анализа и метод конечных элементов. / Пер. с англ. А. С. Алексеева и др.; Под ред. А. Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат. 1982. 448 с.
6. *Л. Турчак, П. Плотников*. Основы численных методов: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2003. – 304 с.
7. *Е. А. Никулин*. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. – СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 560 с.
8. *А. С. Киселев*. Инструкция по эксплуатации экспертной системы оценки напряженного состояния защитной оболочки энергоблока № 1 Ростовской АЭС. ИБРАЭ 244 2007
9. *А. С. Киселев*. Особенности напряженного состояния защитной оболочки АЭС при проектной аварии. Пространственные конструкции зданий и сооружений. – М., Белгород: Изд. БелГТАСМ, 1996. – Вып. 8, с. 150-155.
10. *В. П. Малявин*. Оценка напряженно-деформированного состояния и уровня преднапряжения в железобетонных преднапряженных защитных оболочках реакторных отделений на действующих энергоблоках АЭС с реактором ВВЭР-1000. Сборник трудов. Вып. 4 – М.: ФГУП АЭП, 2003. 184 с.
11. *А. В. Романов*. Численное моделирование системы преднапряжения защитных оболочек реакторных отделений атомных электростанций. – М., Научно-технический журнал: Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №1, 2010. С.49-53. ISSN 1681-6560.
12. НП-001-97, ПНАЭ Г-01-011-97 (ОПБ-88/97) «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций».
13. НП-010-98 «Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций».
14. Пин АЭ-5.6 «Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа».
15. МТ 1.2.2.01.999.00009-2011 с изменением 1 от 16.04.2012. Методика оценки напряженно-деформированного состояния защитных оболочек атомных станций. ОАО АЭП, ОАО СПБАЭП, ОАО «Концерн Росэнергоатом» 2012.
16. Архитектурно-строительные решения. Расчет защитной оболочки на различные воздействия, обоснования выбора мощности пучка СПЗО. NW2O.D.120.010.RL.0016.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PYTHON-СКРИПТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТАБЛЕТОЧНЫХ ТВЭЛОВ

Каширин Б.А.

АО ВНИИНМ, г. Москва, Россия

Таблеточный твэл является сложной конструкцией для трехмерного моделирования и созданием таких моделей могут заниматься специалисты, которые профессионально знают препроцессор программы ABAQUS.cae. В статье описывается подход к созданию 3D моделей для расчетного анализа напряженно-деформированного состояния таблеточных твэлов для инженеров, мало знакомых с ABAQUS.cae. Подход заключается в использовании программ, написанных на языке PYTHON, при котором работа по моделированию сводится к простому заданию геометрических параметров конструкции твэла.

Параметрическое моделирование конструкций

Почти все конструкции можно описать набором геометрических параметров, которые однозначно описывают ее. Так, любую цилиндрическую оболочку можно описать с помощью четырех параметров, а именно: наружный или внутренний радиус оболочки, толщина и высота оболочки. В этот список можно включить и угол развертки оболочки, если мы хотим рассчитывать не замкнутую оболочку. Для расчета оболочки по МКЭ к ее геометрическим параметрам необходимо добавить три параметра ее разбиения на конечные элементы (топологические параметры). Это и будет полный набор данных для создания конечно-элементной модели цилиндрической оболочки. Этот набор надо передать в программу, которая на выходе даст нам трехмерную модель оболочки.

Подобным образом можно описать и другие простые и сложные конструкции. И тут встает вопрос – а когда имеет смысл писать и отлаживать программы разбивки конкретной конструкции, и что это дает по окончании программирования. Тратить время на разработку программы имеет смысл при многократных расчетах одной конструкции, например, при ее оптимизации, или если конструкция повторяется с небольшими изменениями в других проектах. Выгода от этой программы заключается в существенном сокращении времени на не самый интересный этап обоснования прочности конструкции. По опыту известно, что 90% времени при расчете

сложной конструкции идет на разработку ее 3D модели. С помощью параметрического моделирования можно получить оптимальную расчетную модель конструкции, в которую легко вносить любые изменения. Процесс моделирования упрощается, поскольку теперь он сводится к аккуратному заданию параметров конструкции, и эту работу можно доверить сотрудникам без университетских дипломов. Еще одним достоинством программных моделей является их упорядоченная топологическая структура конечно-элементных сеток, что сказывается на качестве расчета.

Таблеточный твэл как объект параметрического моделирования

Эскиз таблеточного твэла реактора ВВЭР 1000 представлен на Рисунке 121. Основным элементом любого твэла являются топливные таблетки, которые размещаются в оболочке твэла. Для исключения разрывов топливного столба, образованного стоящими друг на друге таблетками, столб подпирается пружиной – фиксатором, которая нижней своей частью запрессовывается в оболочку, а верхняя ее часть сжимается (разжимается) при нагреве и расхолаживании таблеток. Конструкция таблеточного твэла идеально подходит для параметрического моделирования, поскольку все его комплектующие описываются небольшим числом параметров, и геометрия их отличается незначительно для самых разных энергетических реакторов.

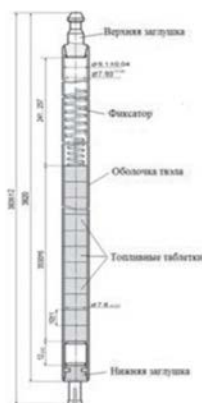


Рисунок 121 – Эскиз таблеточного твэла реактора ВВЭР 1000

Процесс создания геометрической модели твэла проходит в два этапа: на первом этапе создаются модели элементов твэла (таблеток, заглушек и

т.д.), на втором этапе проводится сборка ранее созданных элементов твэла в единую модель. Для сборки твэла нужны свои параметры, которые указывают места расположения деталей твэла. В конце работы программы формируется input файл с моделью твэла.

Модель топливной таблетки

Все производимые в России топливные таблетки, эскизы некоторых показаны на Рисунке 122, могут быть описаны 6-ю геометрическими и 4-мя топологическими параметрами. Параметры таблеток перечислены в Таблице 1. Конечно-элементные, модели различных таблеток приведены на Рисунке 123.

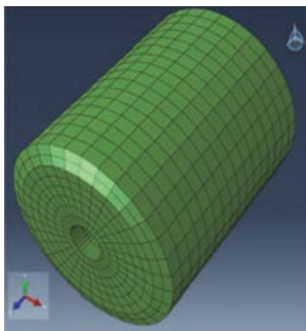


Рисунок 122 – Эскизы таблеток с наборами геометрических параметров
а – таблетка с центральным отверстием; б – таблетка со сферической канавкой

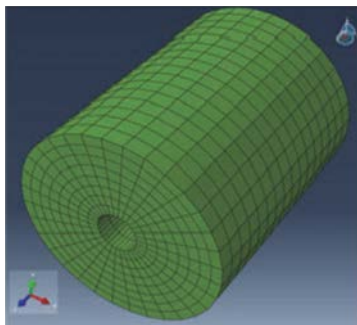
Таблица 1

Параметры топливных таблеток

Геометрические параметры:	Топологические параметры:
1. rv_tab – внутренний радиус таблетки (или gf – радиус сферы по оси вращения)	1. $n1$ -число элементов по радиусу без фаски
2. rn_tab – наружный радиус таблетки	2. n_fc – число элементов по фаске
3. htf – высота фаски	3. na – число элементов по $\frac{1}{4}$ окружности
4. atf – угол фаски (в градусах)	4. nh – число элементов по высоте таблетки
5. h_tab – высота таблетки	
6. $h0$ – глубина вдавливания сферы по оси	

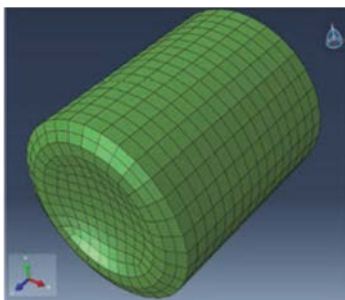


а)

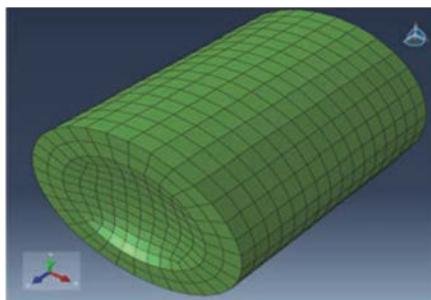


б)

С центральным отверстием: а - с фаской, б - без фаски



в)



г)

С центральной сферической канавкой: в - с фаской, г - без фаски

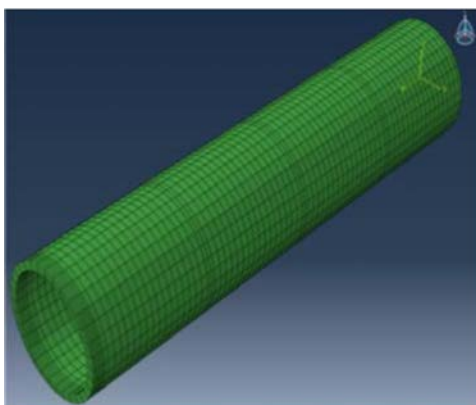
Рисунок 123 – Модели таблеток

Модель оболочки твэла

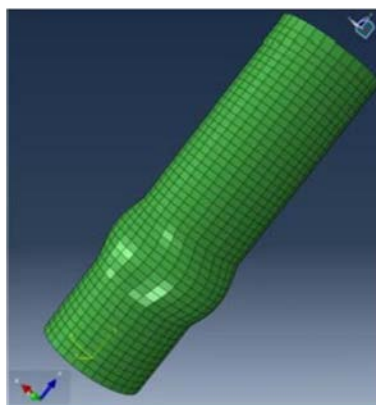
Модель оболочки твэла описывается тремя геометрическими и тремя топологическими параметрами, перечень которых приведен в Таблице 2. Если оболочка имеет начальные дефекты, например, общую или локальную эллиптичность, местное утонение стенки, то в программе предусмотрено дополнительное указание параметров дефекта. Так, при общей эллиптичности достаточно указать коэффициент эллиптичности (соотношение диаметров поперечного сечения оболочки). Модель 4-х таблеточной оболочки твэла приведена на Рисунке 124а. На Рисунке 124б приведена модель оболочки с локальной эллиптичностью.

Параметры оболочки твэла

Геометрические параметры:	Топологические параметры:
1.rv_she–внутренний радиус оболочки	1.ns_she–число элементов по толщине
2.rn_she–наружный радиус оболочки	2.na_she–число элементов по $\frac{1}{4}$ окружности
3. h_she – высота оболочки	3.nh_she – число элементов по высоте



а)



б)

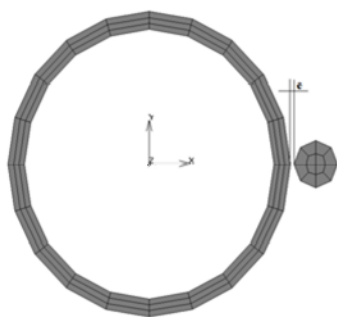
Рисунок 124 – Модели оболочек

а – оболочка твэла для 4-х таблеток;

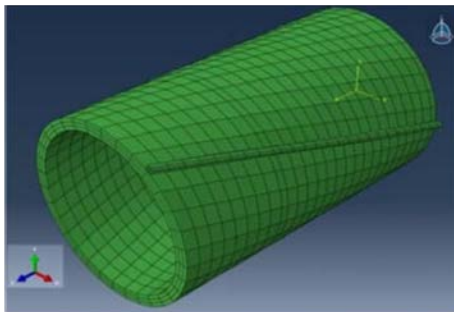
б – модель оболочки с локальной эллиптичностью

Модель оболочки с дистанцирующим профилем

Иногда твэлы в пучке разделяются дистанцирующими профилями, например, навитым на оболочку прутком круглого сечения. В этих случаях в оболочку включается этот профиль, который описывается своими геометрическими и топологическими параметрами. Самый простой случай – круглый пруток, для которого достаточно указать диаметр прутка и число элементов по окружности сечения прутка. Поперечное сечение модели оболочки с прутком показаны на Рисунке 125а, сама модель на Рисунке 125б.



а)



б)

Рисунок 125 – Модель оболочки с дистанцирующим профилем
а – поперечное сечение модели; б – фрагмент модели оболочки с профилем

Модель фиксатора

Фиксатор – цилиндрическая составная пружина, часть витков которой (большого диаметра) запрессовываются в оболочку твэла, а другая часть пружины с витками меньшего диаметра навивки поджимают столб топливных таблеток. Геометрия цилиндрической пружины описывается тремя параметрами: радиус навивки, шаг пружины и число витков. Для сечения пружины (в случае круглой проволоки) достаточно одного параметра – диаметра проволоки (Рисунок 126).

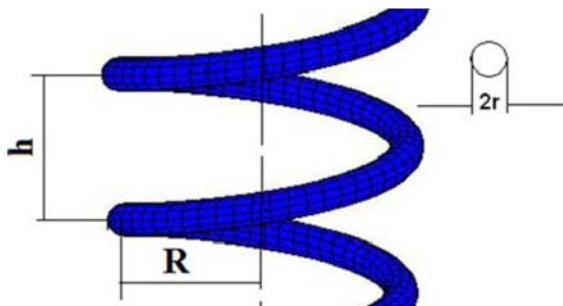


Рисунок 126 – Параметры цилиндрической пружины

Фиксатор с двумя участками описывается двумя наборами параметров, которые располагаются в списке `csg`. Этот список может содержать информацию о нескольких участках пружины, и для каждого из них надо указать: радиус навивки в начале участка, шаг пружины на данном участ-

ке, число витков (не обязательно целое), число элементов по длине участка и радиус навивки последнего витка пружины на участке. Таким образом, можно задать и получить модели самых разных пружин, некоторые из них показаны на Рисунке 127.

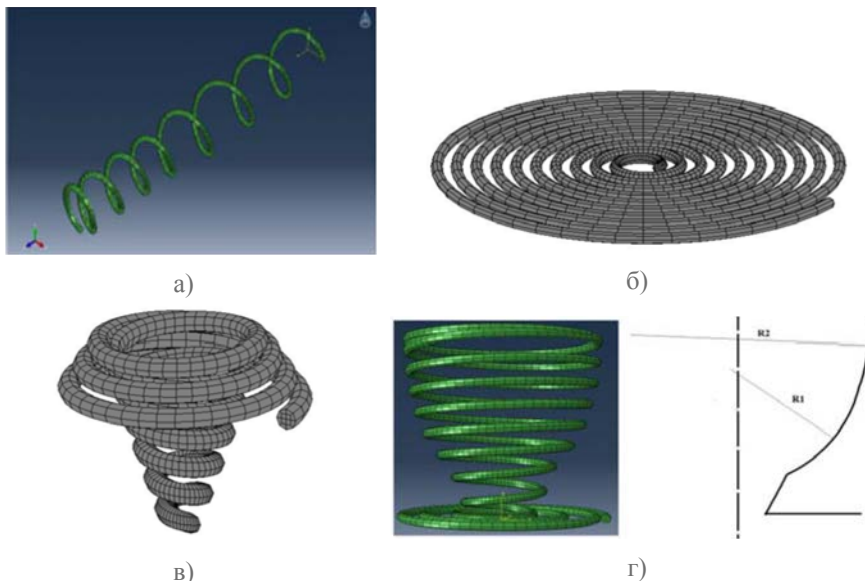


Рисунок 127 – Модели пружин:

- а – фрагмент твэльного фиксатора;
- б – плоская (часовая пружина с нулевым шагом) и прямоугольным поперечным сечением прутка,
- в – вложенная пружина (с отрицательным шагом),
- г – профилированная пружина (с профилем из двух радиусов)

В программе можно задавать любые сечения проволоки (круглые, квадратные, прямоугольные и др.). Кроме этого можно получать различные профилированные пружины, профили которых задаются как формульными кривыми, так и нарисованными от руки. Для профильных пружин необходима отдельная информация. На Рисунке 128 представлена модель реального фиксатора с 55-ю витками.

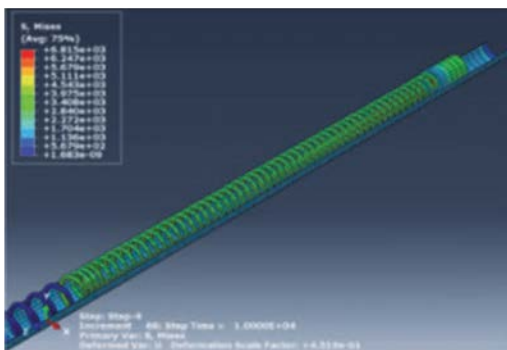


Рисунок 128 – Модель реального фиксатора в расчете. Модель взята из расчета, проведенного Кузнецовым А.В.(АО ВНИИНМ)

Модель заглушки

Заглушка представляет собою деталь вращения (Рисунок 129), и сложность ее разбивки обуславливается только тем, что в моделях используются только конечные элементы типа C3D8, C3D20. Разбивка упрощенных деталей вращения с цилиндрическими поверхностями сводится к заданию двух списков. Первый список – список всех радиусов, которые есть в конструкции, и число разбиений между соседними радиусами (сечение нулевого уровня). Второй список содержит информацию по выдавливанию отдельных групп элементов (элементы между соседними радиусами) по высоте.

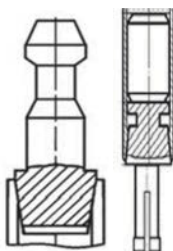
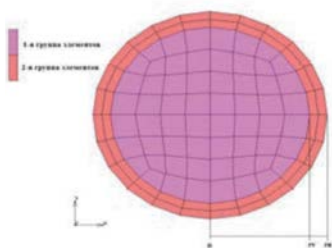
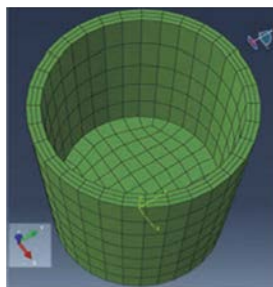


Рисунок 129 – Эскизы заглушек

На Рисунке 130 показана модель оболочки с плоским доньшком, которая была получена, описываемой программой. Более сложная модель представлена на Рисунке 131.



а)



б)

Рисунок 130 – Модель оболочки с плоским дном:

а – сечение нулевого уровня; б – D3 модель



Рисунок 131 – Модель простой детали вращения

Для разбивки сложных деталей вращения используются программы модуля сар.ру. Такие детали могут быть разветвленными, иметь конические и сферические поверхности. Сложная деталь с разветвлениями разбивается на отдельные конструкции, и каждая из них описывается отдельно. Описание конструкции сводится к заполнению списков по опорным точкам внутренней и наружной поверхностей. В это описание входят номер радиуса точки, ступень высоты, число элементов на ступени и номер следующей точки. Структура исходной информации хорошо прослеживается на Рисунке 132. Модель заглушки с гратом (наплыв металла при контактно-стыковой сварке) приведена на Рисунке 133.

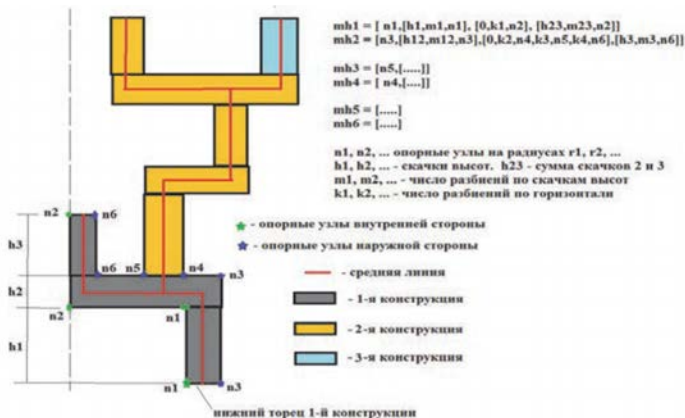


Рисунок 132 – Структура исходной информации сложной детали вращения

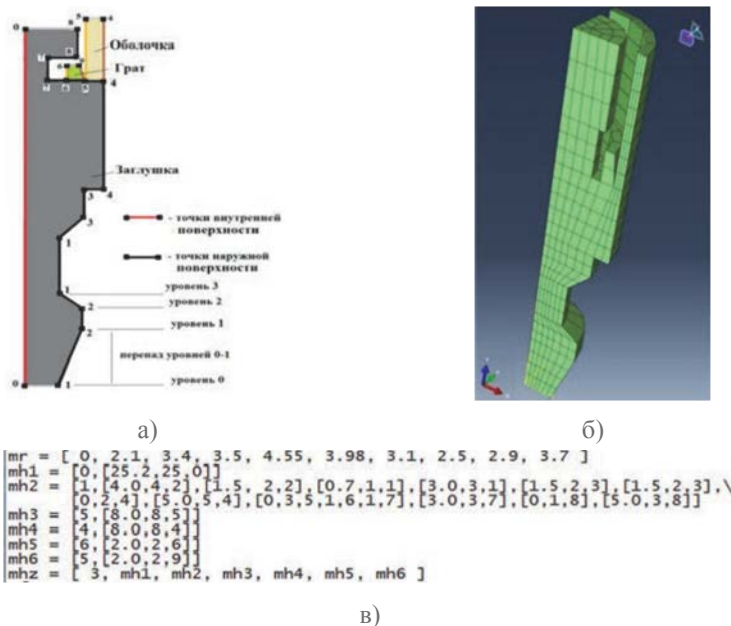


Рисунок 133 – Модель заглушки с гратом: а – сечение заглушки с разделением на отдельные конструкции; б – модель заглушки с разверткой в 90^0 ; в – фрагмент листинга программы с исходной информацией

Модель таблетки с дефектами

Современное производство таблеток допускает небольшой процент продукции с разрешаемыми дефектами (сколы, трещины и т. д). При расчетном анализе в модель твэла могут входить таблетки с дефектами, которые также доступны параметризации. Учет наличия дефектов таблетки, позволяет правильно определить распределение температур в таблетке и ее НДС, что очень важно при определении момента растрескивания таблетки. На Рисунке 134 показаны таблетки с реальными дефектами и модель дефектной таблетки.

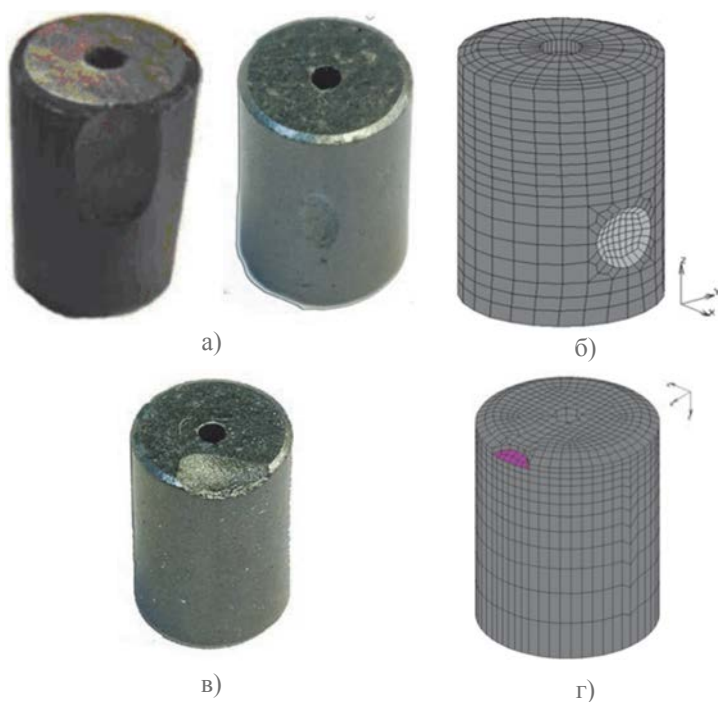


Рисунок 134 – Таблетки с дефектами:

- а – боковые сколы;
- б – модель таблетки с боковым сколом;
- в – торцевой скол;
- г – модель таблетки с торцевым сколом

Предполагается, что любой скол таблетки в плане имеет эллиптическую форму. Тогда его легко описать 5-ю параметрами: площадь скола, соотношение осей эллипса в плане, глубина дефекта, радиус и угол центра дефекта на торце таблетки или высота и угол для бокового скола.

Сборка модели

Расчетные модели твэла могут состоять из разных наборов комплектующих, иногда модель может состоять только из одного элемента, например, из оболочки с эллиптичностью (для исследования потери устойчивости). Для включения элементов в сборку твэла пользователь заполняет список присутствия, в котором факт наличия элемента подтверждается ненулевым числом. Кроме этого списка задаются параметры сборки: тип конечного элемента, масштабный коэффициент, угол развертки модели (может принимать значения 90, 180 и 360 градусов). Эти параметры действуют для всех элементов твэла. На первом этапе моделирования создаются модели всех заявленных элементов, и если этап закончился нормально (без ошибок), программа приступает ко второму этапу – сборке модели твэла. Параметрами сборки являются в основном координаты положения элементов в конструкции, но есть и особые параметры, например, признак соосности размещения таблеток в топливном столбе. При несоосной поставке генератором случайных чисел каждой таблетке задается смещение ее от центральной оси и угол этого смещения. На Рисунке 135 показано размещение 8-ми таблеток случайным образом.

По окончании работы программы мы получим геометрическую модель твэла (Рисунок 135 б, в) с необходимыми выделениями под граничные условия (закрепления узлов, нагруженные давлениями, контактное взаимодействие и т.д.).

Параметры модели твэла определяют не только его геометрию, но и размерность модели. Так если параметр развертки по углу равен нулю, мы получим осесимметричную модель твэла (Рисунок 135 в). Если число элементов по высоте равно нулю, мы получим плоскую модель.

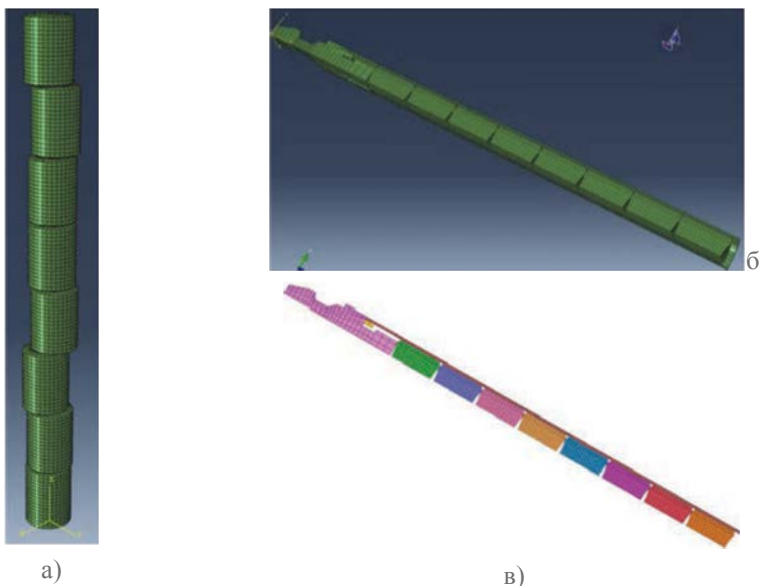


Рисунок 135 – Модели твэла: а – несоосное постановка таблеток;
 б – соосная модель восьми таблеточного твэла с разверткой в 90^0 ;
 в – осесимметричная модель восьми таблеточного твэла

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

Перцукова У.А., Воронков В.И.

МАМИ, г. Москва, Россия

К числу наиболее перспективных и эффективных направлений процессов формообразования деталей из листового металла относится технология штамповки эластичными средами, имеющая ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами штамповки в металлических штампах [Томилов М.Ф., 1999], в первую очередь для единичного и мелкосерийного производства, при котором не рационально использовать штамповку в жестком инструменте, так как, трудозатраты на изготовление

и наладку штампа слишком велики. Процессы листовой штамповки эластичными средами характеризуются универсальностью и мобильностью, простотой внедрения и удобством обслуживания, а также высокой экономической эффективностью, в связи с тем, что данная технология существенно снижает затраты на производство за счет снижения металлоемкости и трудоемкости наладки штампа по сравнению с жесткими инструментальными штампами.

Основной проблемой при разработке технологии формообразующих операций штамповки эластичной средой является недостаток руководящих материалов и четких рекомендаций по конструированию инструмента, выбора марки и толщины полиуретана, геометрии заготовки. Кроме того, по всей видимости, подобные рекомендации достаточно трудно составить, т.к. эксперименты и моделирование показывают, что процесс формоизменения сильно зависит от свойств полиуретана и его толщины, а это значит, что при использовании различных марок полиуретана и различных оснасток для его фиксирования оптимальные параметры процесса отличаются. Разработка технологии с использованием моделирования при достижении высокой точности расчётов существенно повышает качество изделий и сокращает трудоемкость на единицу продукции для единичного и мелко-серийного производства, а значит перед исследователями и технологами возникает новая проблема – корректно поставить задачу моделирования. Точность расчётов зависит от множества факторов, а оценить качество постановки задачи можно только на основании экспериментальных данных, которых зачастую нет. Поэтому, было решено провести исследование направленное не на разработку технологий штамповки эластичной средой конкретного типа изделий, а на определение наиболее оптимальных способов постановки задачи моделирования рассматриваемого процесса, в общем.

В качестве инструмента для получения надежных результатов, в области моделирования штамповки эластичной средой, был выбран программный комплекс Abaqus/CAE. Программное обеспечение Abaqus/CAE ориентировано на решение задач с учетом различных видов нелинейностей и на проведение сложного статического и динамического анализа в рамках единого подхода, сочетая преимущества явного и неявного метода конечно-элементного анализа. Как следует из выше сказанного, одним из пре-

имущества Abaqus/CAE является его универсальность и использование классических проверенных численных методов расчета. Рекомендации по моделированию штамповки эластичной средой в данной программе можно использовать практически всеми программами, основанными на методе конечных элементов.

Исследование проводили при штамповке деталей «буква М», «буква У» (Рисунок 136), входящих в конструкцию художественного изделия «Эмблема Университета машиностроения», а также корпуса часового механизма (Рисунок 137). Можно выделить две основные схемы процесса штамповки эластичной средой при формообразующих операциях: вытяжка и обжим.



Рисунок 136 – Детали «буква М», «буква У», полученные методом штамповки эластичной средой



Рисунок 137 – Деталь «корпус часового механизма», полученная методом штамповки эластичной средой

Проанализировав, какие могут возникнуть дефекты при указанных схемах деформирования, были выявлены основные проблемы рассматриваемой технологии и параметры их оценки инструментами Abaqus/CAE (Таблица 1).

Для правильной постановки задачи, которая позволит решить указанные выше проблемы, необходимо разработать рекомендации, которые, в свою очередь, будут касаться следующих особенностей моделирования явным методом:

1. Выбор типа имитации эластичной среды;

2. Выбор типа сетки конечных элементов;
3. Другие особенности расчёта явным методом.

Таблица 1

**Проблемы, возникающие при моделировании процесса штамповки
эластичной средой и параметры их оценки инструментами
Abaqus/CAE**

Проблема	Параметр оценки
Гофрообразование при обжатии	Визуальное отображение при мелкой сетке. Вывод поля толщин (STH).
Разрывы при вытяжке	Вывод поля отношения предельной деформации к расчётной (FLDCRT).
Образование не втянутого фланца при зажатии кромки заготовки полиуретаном	Визуальное отображение.
Превышение силы	Заполнение гравюры полиуретаном при приложении максимально возможного давления ограниченного возможностями оборудования.
Разрушение полиуретана	Сопоставление расчётной накопленной деформации (PEEQ) с предельно допустимой (в случае использования линейно упругой модели) по рекомендациям производителя или справочной литературы. Использование моделей разрушения.
Разрушение матрицы	Сопоставление расчётных напряжений (S) с предельно допустимыми по рекомендации производителя или справочной литературы. Использование моделей разрушения.

Как показывают результаты сравнения данных моделирования с экспериментом, все указанные выше обобщенные этапы постановки задач принципиальным образом влияют на полученный результат. Более подробно рассмотрим каждый из них.

Выбор типа имитации эластичной среды – один из важнейших аспектов при моделировании штамповки эластичной средой. На данном этапе необходимо найти компромисс между сложностью расчетной модели и требуемой точностью моделирования.

В данной работе рассмотрели три типа имитации эластичной среды:

1) Эластичная среда имитируется приложением давления на поверхность заготовки (Рисунок 138).

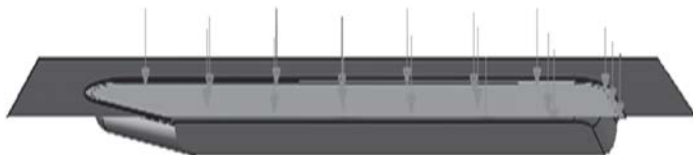


Рисунок 138 – Схема постановки задачи, где эластичная среда имитируется приложением давления на заготовку

Такой способ моделирования дает недостаточную сходимость с результатами эксперимента. Расхождение как по геометрии не втянутого фланца, так и в отсутствие такого дефекта как не до штамповка. Также при таком методе имитации полиуретана на модели возникает такой дефект как плоскостность, который в эксперименте не наблюдается (Рисунок 139).



Рисунок 139 – Сравнение результатов моделирования с экспериментом

2) Как попытка скорректировать расхождение по геометрии не втянутого фланца был рассмотрен другой способ имитации полиуретана: давление эластичной среды представляет собой комбинацию давления, заданно-

го на поверхность заготовки, с давлением, заданным на кромки заготовки при помощи прижима (Рисунок 140).



Рисунок 140 – Схема постановки задачи, где эластичная среда имитируется Приложением давления на заготовку, кромки заготовки зажаты

Однако такой способ даёт существенное расхождение с экспериментом: остаётся достаточно большой не втянутый фланец по всей кромке детали (Рисунок 141).



Рисунок 141 – Сравнение результатов моделирования с экспериментом
Расхождение по геометрии фланца.
Возникновение эффекта не плоскостность

Это можно объяснить тем, что достаточно трудно найти оптимальное отношение между прилагаемым давлением и силой прижима, то есть задать такое отношение, которое более или менее точно имитировало зажатие заготовки полиуретаном. Как и в предыдущем случае недоштамповка не моделируется, что не соответствует реальности, и также возникает неплоскостность.

3) Эластичная среда – деформируемое тело (полиуретан) (Рисунок 142).

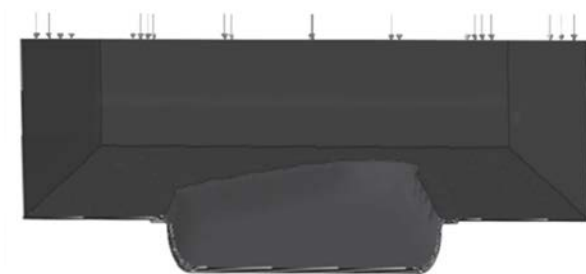


Рисунок 142 – Схема постановки задачи, где эластичная среда деформируемое тело (модель полиуретана)

В целом, данный способ дает наилучший результат, хорошо совпадающий с результатом эксперимента, как по величине не втянутого фланца, так и по недоштамповке (Рисунок 143).



Рисунок 143 – Сравнение результатов моделирования, где тип имитации эластичной среды деформируемое тело (модель полиуретана) с реальным экспериментом

Однако, для того чтобы повысить точность расчета можно использовать различные модели полиуретана. В работе рассмотрены три вида различных моделей: линейно-упругая, линейно-упругая модель с «пластическими свойствами» (где напряжение, переходящее в пластическое состояние соответствует прямой линии зависимости по закону Гука) и нелинейно-упругая модель.

Одна из возможных нелинейно-упругих моделей, которую можно использовать в Abaqus/CAE – модель Ogden. Потенциальная энергия материала в модели Ogden выражается по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda^{-\alpha_i} + \lambda^{\alpha_i} + \lambda^{-\alpha_i} - 3) + \sum_{i=2}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i},$$

где μ_i , α_i – коэффициенты, определяющие свойства материала, D_i – коэффициенты, отражающие температурное влияние на свойства материала, так как в рассматриваемых процессах температура полиуретана практически постоянна, то зависимость от температуры не рассматривали и коэффициенты равны нулю [Abaqus Analysis User's Manual].

При использовании первой и второй модели моделирование дает схожий результат, хорошо совпадающий с экспериментом. Третья модель дает сходимость с экспериментом хуже, чем первая и вторая при грубой сетке, но практически идеальную сходимость при мелкой сетке смешанного типа. Исходя из этого, был проанализирован еще один важный этап постановки задачи – выбор типа сетки конечных элементов.

Выбор типа сетки конечных элементов. В данной исследовательской работе были использованы три варианта создания сетки: свободная, структурная, смешанная. Свободный тип сетки – применяется в местах со сложной геометрией, где невозможно задать определённую структуру сетки повторяющей контуры заготовки или инструмента. В таких областях необходимо создавать мелкую свободную сетку, однако для быстрых оценочных расчётов можно применять свободную сетку и для деталей не сложной формы. Структурный тип сетки задается для получения более точных расчётов. При создании такой сетки необходимо создавать специальные области, где свойства наложения сетки обеспечивают максимальное повторение сеткой контуров детали и инструмента. Смешанный – это наиболее сложный в плане задания, но наиболее эффективный в плане точности расчётов тип сетки конечных элементов, где области, в которых происходят наибольшие деформации, заданы структурной сеткой, а в тех областях, где малые деформации для ускорения расчета задается крупная свободная сетка.

Из анализа сравнения данных моделирования и эксперимента можно дать следующие рекомендации: если необходимо произвести только качественный анализ, то можно использовать свободную сетку и модель полиуретана как линейно-упругую среду (за исключением осесимметричных задач, где всегда нужно задавать структурную осесимметричную сетку), а

для получения более точных количественных результатов нужно использовать смешанный тип сетки, стараться всегда задавать структурную сетку в областях наибольших деформаций, и использовать нелинейно-упругую модель полиуретана.

Как было сказано выше, в Abaqus/CAE используется два метода решения задач: явный и неявный метод конечно-элементного анализа. По рекомендациям производителей программного комплекса Abaqus для расчета динамических процессов, к которым можно отнести и процесс штамповки, лучше применять явный метод. Явный (explicit) метод используется решателем Abaqus/Explicit, не требует одновременного решения матричного уравнения равновесия и вычисления глобальной матрицы жесткости. Задачи решают пошагово кинематические [Яхно Б.О., 2011].

Для ускорения расчетов явным методом часто применяется *масштабирование массы (Massscaling)*. Ускорение расчета достигается за счет увеличения массы и, как следствие, увеличение периода упругих колебаний в системе. Наибольшее влияние масштабирование массы оказывает на моделирование дефектов гофрообразования и неплоскостности. Применение масштабирования массы может привести к появлению неплоскостности в тех случаях, когда в реальности такого дефекта не возникает и к увеличению гофрообразования, относительно реального эксперимента. Масштабирование массы рационально применять в случае, когда материал не находится в свободном состоянии, а прижат полиуретаном к матрице. Иными словами при моделировании процессов по схеме вытяжки масштабирование массы вносит меньшую погрешность в расчёт, чем при моделировании по схеме обжима.

Возвращаясь к проблемам, указанным в Таблице 1, рассмотрим оставшиеся две – это разрушение полиуретана и разрушение матрицы (Рисунок 144). И та, и другая задача требуют рассмотрения математической модели разрушения материала: матрицы и, соответственно, полиуретана.

Пока данная задача в перспективе развития данной темы исследования, но грубую оценку возможности разрушения полиуретана можно сделать по накопленным деформациям и по анализу напряженного состояния. Далее, следуя рекомендациям производителей, можно установить, какие предельные деформации для полиуретана допустимы в определенном напряженном состоянии, например, так можно найти рекомендации по предельной деформации полиуретана при растяжении.



Рисунок 144 – Разрушение матрицы при проведении эксперимента штамповки эластичной средой

В заключении можно сделать вывод, что моделировать процесс штамповки эластичной средой можно разными способами. Наиболее простые способы постановки задачи дают достаточно грубый результат, более сложные способы постановки задач дают точные результаты, иногда практически идеально воспроизводящие реальный эксперимент, но, такие расчеты занимают много времени. Подводя итог, можно свести рекомендации по моделированию штамповки эластичной средой к схеме, показанной на Рисунке 145.

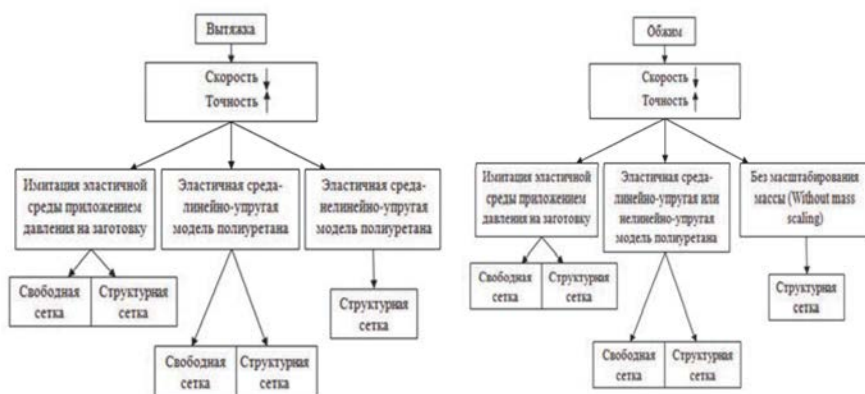


Рисунок 145 – Схема рекомендаций по моделированию штамповки эластичной средой

Список литературы

1. Томилов М.Ф. Повышение эффективности процесса формообразования деталей из листа эластичной средой в жесткой матрице: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.03.05) / Томилов Марат Федорович; – Воронеж, 1999. – 26 с.
2. Abaqus Analysis User's Manual // <http://loik-pc:2080/v6.12/books/usb/default.htm> (дата обращения: 16.04.2016)
3. Яхно Б.О. ABAQUS у задачах механіки. навч. посіб./ – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 128с.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ДЕФЕКТА ТИПА «ВМЯТИНА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SIMULIA ABAQUS

Дмитриева А.С., Лягова А.А.

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Стальные вертикальные цилиндрические резервуары (РВС) для хранения нефти и нефтепродуктов представляют собой тонкостенные металлоконструкции, работающие циклично в условиях сложного напряженно-деформированного состояния (НДС). Резервуары подвергаются комплексу внешних воздействий: нагрузок, температур и агрессивных рабочих сред и имеют те или иные дефекты и повреждения, обусловленные как конструктивными и технологическими несовершенствами, так и влиянием внешних эксплуатационных факторов. В процессе эксплуатации резервуаров в результате нарушений технологии монтажа или ремонта металлоконструкций, неравномерной осадки оснований резервуаров, при непредвиденном механическом воздействии могут возникать различные конструктивные несовершенства (вмятины, отклонения от цилиндрической формы), которые снижают устойчивость их корпусов и тем самым сокращают срок эксплуатации, уменьшают надежность и приводят к авариям.

Проблема прогнозирования эксплуатационной надежности и долговечности резервуарных конструкций является весьма актуальной, ее реализация позволит приблизиться к решению важной проблемы – обеспечению их безаварийной эксплуатации, снижению до минимума риска возникновения аварий и, тем самым к экономии значительных материальных средств, затрачиваемых на ремонтные и восстановительные работы.

При проведении дефектоскопии резервуара и его конструкционных элементов на объектах магистрального транспорта нефти при обнаружении дефектов зачастую возникает проблема оценки их влияния на техническое состояние и возможности дальнейшей эксплуатации конструкции резервуара.

Следует отметить, что действующие нормативные документы [1] устанавливают достаточно жесткие критерии допускаемой величины стрелки прогиба вмятины. При этом не учитываются ни геометрические размеры (ширина, форма) вмятин, ни их месторасположение по высоте стенки резервуара.

Опыт многолетней безотказной эксплуатации резервуаров с данным дефектом формы, не удовлетворяющим требованиям норм [1], свидетельствует об отсутствии достаточной обоснованности вводимых ограничений, что также подтверждено в работах [2-4]. Согласно нормативным документам [1,5] при обнаружении вмятин эксплуатация возможна только, если выполнены расчеты НДС и доказано, что в стенке металлоконструкции отсутствуют предельные напряжения и дефект не приводит к потере устойчивости стенки.

В ходе проведения полного технического диагностирования резервуара РВСП-5000 на поверхности стенки обнаружена вмятина (причина возникновения неизвестна). На обечайке его приемо-раздаточного патрубка так же был зафиксирован дефект типа «вмятина», полученный вследствие падения крюка строительного крана во время установки крыши резервуара.

Предполагается, что не существует комбинации внешних эксплуатационных нагрузок, способных вызвать наступление предельного состояния в патрубке резервуара. Кроме этого, сроки поставки элементов конструкции резервуара, погодные условия, финансовые затраты не всегда позволяют своевременно выполнить ремонт резервуара. В связи с этим, актуальным

является определение возможности эксплуатации патрубка с вмятиной, а его замену приурочить к следующему капитальному ремонту.

Необходимо определить возможность дальнейшей эксплуатации патрубка с дефектом данного типа путем установления значений внутренних усилий, действующих в дефектном участке, и сравнения полученных значений максимальных напряжений с расчетными сопротивлениями материала патрубка.

Таким образом, представим методику численного анализа НДС резервуара с дефектами типа «вмятина» в стенке и на обечайке приемораздаточного патрубка с целью определения допустимых условий эксплуатации РВС.

Объект исследования

Объектом исследования являлся резервуар РВСП-5000 для хранения автобензина плотностью 770 кг/м^3 , введенный в эксплуатацию в 1962 году, выполненный из стали СтЗсп (предел текучести – 245 МПа, предел прочности – 370 МПа).

Визуально-измерительный контроль резервуара показал, что на расстоянии 8483 мм от днища на поверхности стенки имеется вмятина с геометрическими параметрами: малая ось – 420 мм; большая ось – 1100 мм; стрела прогиба (глубина) – 39,1 мм.

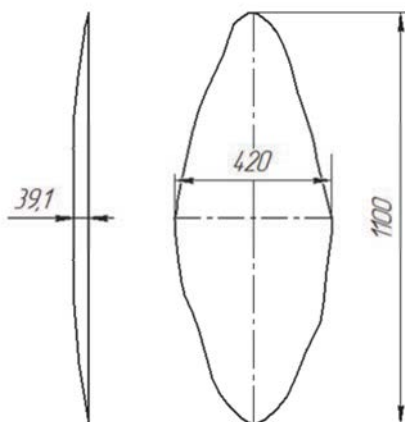


Рисунок 146 – Геометрия вмятины

Также в ходе проведения технического диагностирования резервуара РВСП-5000 на обечайке его прямо-раздаточного патрубка был обнаружен дефект типа «вмятина», полученный вследствие падения крюка строительного крана во время установки крыши резервуара.

Рассматривается патрубок DN500 типа «S» резервуара РВСП-5000, дефект расположен на обечайке ПРП. На Рисунке 146 представлено конструктивное исполнение ПРП. Глубина вмятины – 7мм. Материал патрубка – сталь СтЗсп (предел текучести – 245МПа, предел прочности – 370МПа).

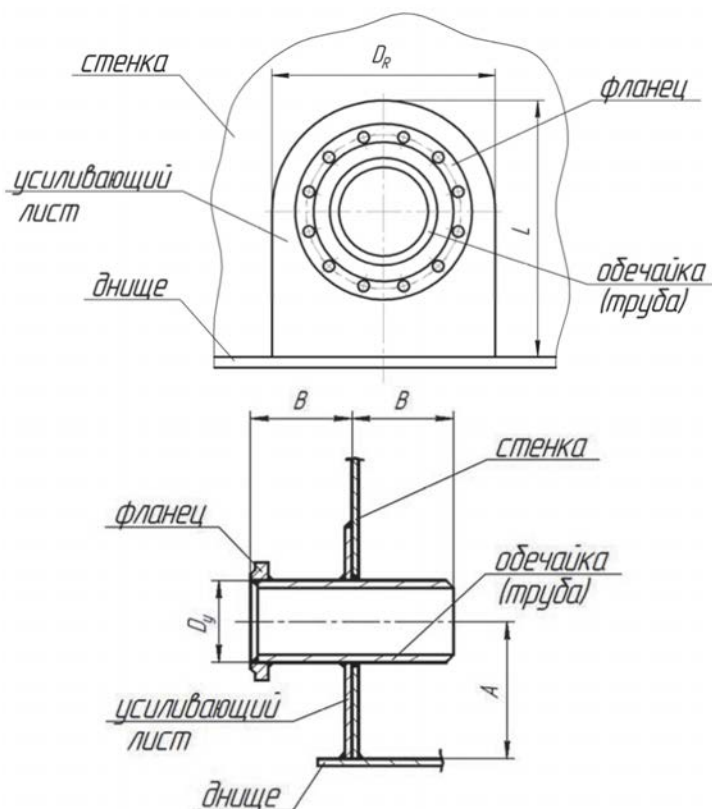


Рисунок 147 – Конструкция патрубка типа «S»

Реализация задачи в программном комплексе SIMULIA ABAQUS

Определение НДС в стенке резервуара

Расчет НДС в ПК Abaqus проходит следующим образом. Создается математическая модель исследуемого объекта, включающая: построение его геометрии, задание материала изготовления с помощью физических свойств металла, задание нагрузок и давлений, граничных условий, разбиение модели конечно-элементной сеткой, и выбор выходных данных.

При создании конечно-элементной модели резервуара были заданы следующие характеристики материала: модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона – 0,3; плотность – 7850 кг/м^3 . Так как данная задача является осесимметричной, то моделировалась четверть резервуара, что позволило использовать более мелкую сетку. При создании модели использовались элементы Shell, которым были присвоены фактические толщины стенки РВСП-5000 (Рисунок 148). При моделировании и обработке результатов расчетов использовалась цилиндрическая система координат.

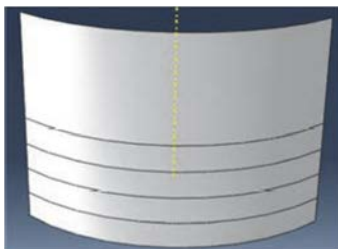


Рисунок 148 – Модель конструкция резервуара РВСП-5000

К модели резервуара были приложены следующие нагрузки и граничные условия:

1. Жесткое закрепление днища резервуара;
2. Распределенный вес крыши и оборудования, снеговая нагрузка;
3. Гидростатическое давление, соответствующее уровню налива (10,26м);
4. Условие симметрии;
5. Избыточное давление паров нефти;
6. Сила гравитационного воздействия;
7. Перемещение объекта воздействия на величину, соответствующую геометрии вмятины.

Так, методом конечных элементов были определены: кольцевые напряжения и продольные напряжения в резервуаре (Рисунок 149).

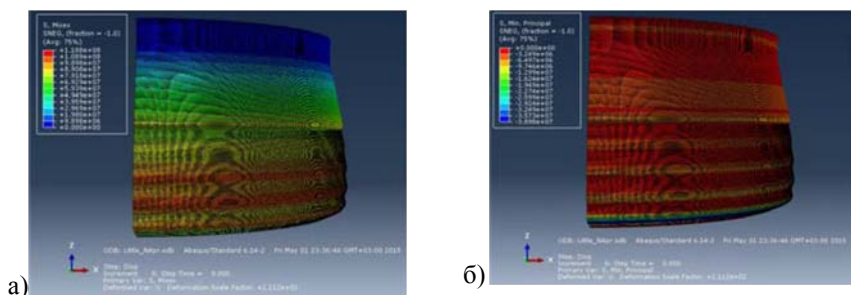


Рисунок 149 – Распределение напряжений в стенке резервуара:

а – кольцевые, б – продольные

Было произведено сравнение результатов расчетов НДС резервуара РВСП-5000, выполненных по [6] по формулам (1) и (2) и с помощью ПК Abaqus. Графики сравнения методов расчета представлены на Рисунке 150.

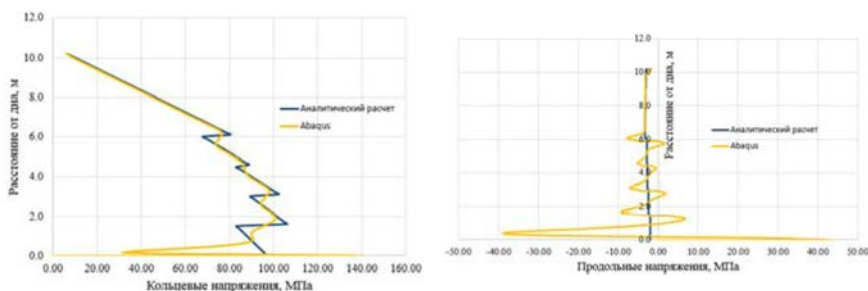


Рисунок 150 – Графики сравнения результатов расчета, полученных аналитически и с помощью ПК SIMULIA Abaqus:

а – кольцевые напряжения, б – продольные напряжения

Как видно из графиков аналитические расчеты не принимают во внимание краевой эффект в нижних поясах резервуара (жесткая заделки дна). Скачки на графике кольцевых и продольных напряжений соответствуют изменению толщины стенки резервуара по поясам.

Моделирование вмятины в стенке резервуара

Создание вмятины в модели резервуара сводилось к процессу моделирования контактной задачи. Вмятина моделировалась путем воздействия сферической поверхности на стенку резервуара.

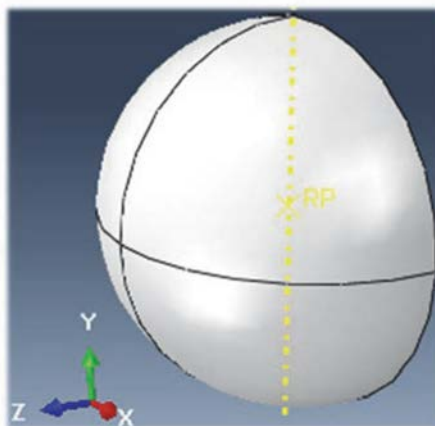


Рисунок 151 – Объект воздействия – сферическая поверхность

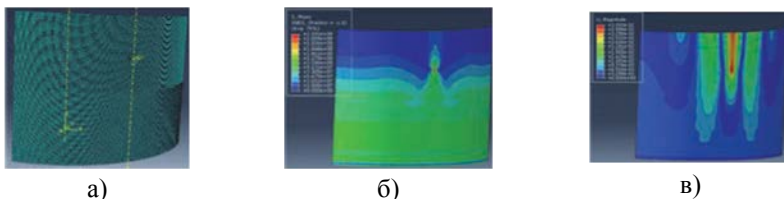


Рисунок 152 – Моделирование воздействия вмятины:

- а – КЭ модель резервуара с действующим на нее полусферическим объектом, б – поверхностные напряжения по Мизесу, в – перемещение поверхности стенки резервуара

Контактная задача сводилась к определению радиуса полусферы и силы, с которой она будет действовать на поверхность стенки резервуара. После их определения в ПК Abaqus была создана стальная полусфера, которая была позиционирована в сборке модели на высоту 8483 мм от дна резервуара для создания вмятины требуемой глубины.

Затем были определены поверхностные напряжения в стенке резервуара по Мизесу и перемещения поверхности стенки резервуара. Максимальные поверхностные напряжения возникают в центре вмятины и равны – 219,1МПа.

Моделирование вмятины на обечайке прямо-раздаточного патрубка

Также была смоделирована нештатная ситуация – образование дефекта «вмятина» на прямо-раздаточном патрубке РВСП-5000 вследствие падения крюка строительного крана во время установки крыши резервуара. Анализ влияния вмятины сводился к решению динамической задачи с применением импактора, выполняющего роль крюка, который во время падения деформирует поверхность патрубка.

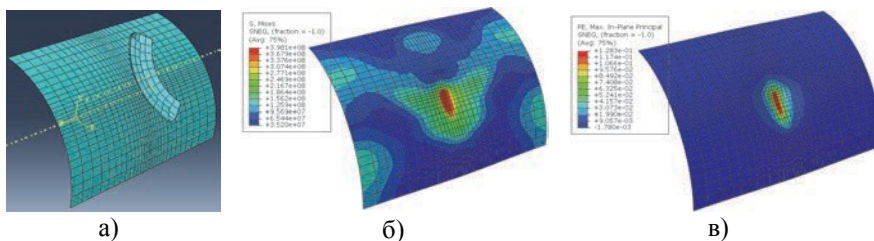


Рисунок 153 – Моделирование вмятины: а – КЭ модель обечайки с импактором, б – распределение напряжений по Мизесу, в – распределение пластических деформаций в стенке патрубка

Заключение на основе полученных результатов моделирования

Согласно [1], для предельных напряжений в стенке стального цилиндрического резервуара задается ограничение, согласно которому эквивалентные напряжения сравниваются с допускаемыми, равными пределу текучести стали:

$$\sigma_{\text{пов}} \leq \sigma_{\tau} , \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{пов}}$ – поверхностные напряжения в стенке резервуара (напряжения по Мизесу);

σ_{τ} – предел текучести стали, для СтЗсп – 245МПа.

Установлено, что максимальные поверхностные напряжения возникают в центре вмятины и равны – 219,1МПа, при этом условие недопустимых напряжений (1) в резервуаре с вмятиной выполняется. Таким образом, для

вмятины в стенке резервуара выполняется условие прочности, и область стенки резервуара с вмятиной не переходит в область недопустимых пластических деформаций.

Найдено значение критической глубины вмятины (58,05мм), при котором возникают недопустимые пластические деформации, и резервуар необходимо выводить в ремонт.

Проанализируем результаты моделирования поведения металла обечайки ПРП.

Максимальные напряжения в зоне контакта с крюком крана составляют **398,1МПа**, а перемещения – **22,57мм**.

Представим график изменения значения перемещения стенки патрубка и напряжений по Мизесу (Рисунок 154).

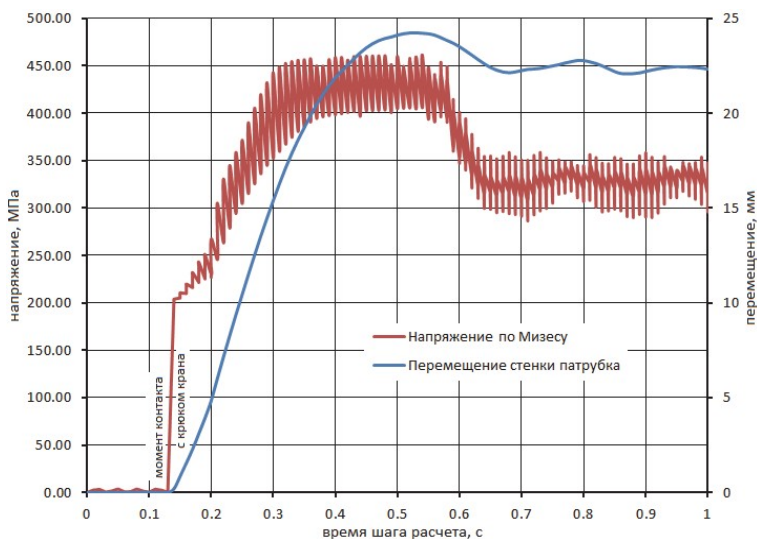


Рисунок 154 – График распределения напряжений и перемещений в центре вмятины

Как видно из графика на Рисунке 154 при моменте падения крюка крана с оголовком на тело патрубка (0.12 с) происходит резкий скачок напряжений до 200 МПа, далее приращение напряжений происходит в более плавном режиме. На интервале от 0.3с до 0.56с напряжения остаются примерно на одном уровне – 425МПа, а после снижаются и к концу шага рас-

чета остаются постоянными на уровне 340МПа. На интервале от 0.3с до 0.56с происходит рост напряжения под действием веса крана, а после окончания контакта поверхности патрубка с поверхностью крана напряжения спадают, и перемещения стенки уменьшаются под действием внутреннего давления (от 28.5мм до 22.5мм).

Пластическая деформация обечайки ПРП составляет 12,83%, из чего можно сделать вывод, что металл патрубка перешел из области упругой в область пластической (необратимой) деформации, что является недопустимым при эксплуатации резервуара.

Можно сказать, что локальные искажения формы поверхности обечайки при каком-либо внешнем воздействии приводят к возникновению недопустимых напряжений в стенке обечайки, а, следовательно, к недопуску эксплуатации резервуара. Именно поэтому необходимо соблюдать все правила техники безопасности при производстве работ и эксплуатации, чтобы не допускать возникновения повреждений металлоконструкции резервуара и аварийных ситуаций в целом.

Список литературы

1. РД-23.020.00.-КТН-296-07 Руководство по оценке технического состояния резервуаров ОАО «АК «Транснефть». – Введ. 2007-11-02. М.: Транснефть, 2007. – С. 135.
2. *Галеев В.Б.* Аварии резервуаров и способы их предотвращения. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат». 2004. – С. 164.
3. *Евдокимов В.В, Труфанов Н.А., Сметанников О.Ю.* Дифференцированный подход к определению допустимых размеров вмятин на поверхности стенки вертикальных цилиндрических резервуаров // Промышленное и гражданское строительство. – 2006 г. – №6. – С. 73.
4. *Могильнер Л.Ю.* Расчет допустимых условий эксплуатации стенки резервуара с дефектами геометрии на основе данных технического диагностирования // Трубопроводный транспорт. – 2009 г. – №4. – С. 64.
5. РД 08-95-95 Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – Введ. 1995-09-01.: АО «ВНИИмонтажспецстрой», 2013. – С. 19.
6. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – М: ЗАО « Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 240 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ SIMULIA ABAQUS ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО- НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСРЕДНЕНИЯ

Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н.

ФГБУН РАН, г. Москва, Россия

В работе рассматриваются физические процессы в структурно-неоднородных периодических средах с многослойными включениями сферической или цилиндрической формы (Рисунок 155), соответствующие уравнениям с быстро осциллирующими коэффициентами [1], нелинейным образом зависящими от внешних факторов. Для таких уравнений развивается методика численного моделирования процессов деформирования и распространения тепла в неоднородном материале с точным учетом микроструктуры включений, основанная на двухуровневой схеме [2] асимптотического усреднения нелинейных уравнений с быстро осциллирующими коэффициентами, зависящими также и от пространственных координат. Эта методика [3–6] разделяет процессы на микро- и макроуровне, протекающие в неоднородном материале, с помощью функций быстрых и медленных переменных. В результате асимптотического усреднения для этих функций выводятся соответственно уравнения на ячейке периодичности и усредненное уравнение для всего материала. Усредненное уравнение соответствует материалу с эффективными характеристиками. Различные методы исследования эффективных свойств структурно-неоднородных материалов [6–8] так или иначе опираются на решение вспомогательной задачи, описывающей физическое поведение материала вблизи неоднородных включений. В методе асимптотического усреднения эта задача имеет строгое математическое обоснование [3] и определяет точный алгоритм построения нелинейной диаграммы эффективных теплофизических и механических свойств материала с учетом всех особенностей взаимодействия частиц включений между собой, основанная на точном решении задачи для функций быстрых переменных в параметрическом пространстве.

Непосредственное конечно-элементное моделирование сложно организованных материалов является дорогостоящей процедурой, требующей значительных вычислительных ресурсов. В связи с этим приобретают ак-

туальность эффективные аналитико-численные методы [9–15], основанные на аппроксимации решения специальными системами функций, точно удовлетворяющими исходной системе уравнений и контактными условиями на межфазных границах в многослойных включениях. В отличие от традиционного подхода к методу асимптотического усреднения, помимо двух типов переменных – быстрых и медленных – при асимптотическом анализе уравнений вводится еще дополнительный набор параметров, соответствующий нелинейным зависимостям свойств материала от температуры, деформаций и пространственных координат; соответственно функции быстрых переменных рассматриваются в параметрическом пространстве. Следует отметить, что в рамках рассматриваемой методики зависимость свойств материала от пространственных координат позволяет смоделировать не только классические периодические структуры, а также и градиентные (с плавно изменяющимися от ячейки к ячейке свойствами) и структурно-градиентные материалы (материалы, имеющие непериодическое расположение включений, подчиняющееся некоторой плавной зависимости, см. Рисунок 156).

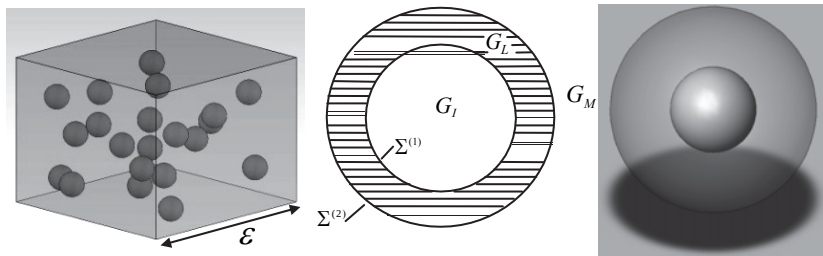


Рисунок 155 – Типовой элемент структуры композитного материала на основе однородной матрицы и межфазные слои, окружающие включение

На Рисунке 156а представлена исходная периодическая структура, соответствующая быстро осциллирующим коэффициентам $\kappa_{ij} = \kappa_{ij}(x \notin)$ в исходном уравнении. На Рисунке 156б представлена структура, полученная путем дополнительного сжатия материала в направлении оси x_1 и соответствующая коэффициентам $\kappa_{ij}(\xi, x) = \kappa_{ij}(\xi_1, x_1, \xi_2)$, $\xi = x/\varepsilon$. Далее на

Рисунок 156в распределение и форма включений получены равномерным радиальным сжатием исходной периодической структуры $\kappa_{ij}(\xi, x) = \kappa_{ij}(\xi \sqrt{x_1^2 + x_2^2})$, а на Рисунке 156г материал сжат неравномерно в обоих направлениях x_1 и x_2 .

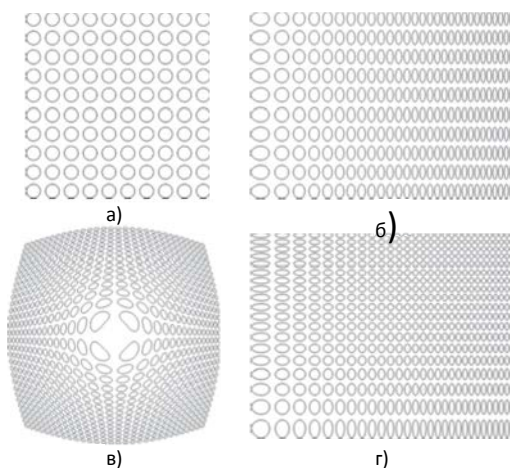


Рисунок 156 – Структурно-градиентные материалы, описываемые дополнительной зависимостью коэффициентов исходного уравнения от пространственной координаты

При таком устройстве внутренней структуры материала его эффективные характеристики получаются в результате решения задачи на ячейке периодичности при множественном варьировании дополнительного набора внешних параметров, и для расчета которой требуется эффективный метод решения. В настоящей работе развиваются вычислительные средства для эффективного решения этой задачи в конечно-элементном пакете ABAQUS. Здесь также развиваются конечно-элементные подходы решения усредненной задачи для функций медленных переменных с эффективными характеристиками, зависящими от температуры и пространственных координат, средствами ABAQUS.

Двухуровневая схема асимптотического усреднения нелинейных задач термоупругости

Рассматривается задача нелинейной термоупругости в структурно-неоднородной области [2], образованной включениями сферической или цилиндрической формы с промежуточным межфазным слоем (Рисунок 155), при этом предполагается, что в определяющих соотношениях между напряжениями σ_{ij} , деформациями ε_{ij} , тепловым потоком Q_i и температурой T , материальные константы могут зависеть от температуры и пространственных координат, и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= c_{ijkl}(\varepsilon, x, T) \left(\varepsilon_{kl} - T \alpha_{kl}(\varepsilon, x, T) \right), \\ Q &= -\kappa_{ij}(\varepsilon, x, T) \frac{\partial T}{\partial x_j}, \\ c_{ijkl} &= c_{jikl} = c_{ijlk} = c_{klij}, \quad \alpha_{ij} = \alpha_{ji}, \quad \kappa_{ij} = \kappa_{ji}.\end{aligned}\quad (1)$$

В случае изотропии термомеханических свойств материалов, определяющих структурно-неоднородную среду, константы в (1) принимают следующий вид:

$$c_{ijkl} = \mu \left(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{jk} \delta_{il} \right) + \lambda \delta_{ij} \delta_{kl}, \quad \alpha_{ij} = \alpha \delta_{ij}, \quad \kappa_{ij} = \kappa \delta_{ij},$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, λ – первый параметр Ляме, μ – модуль сдвига или второй параметр Ляме, α – коэффициент линейного теплового расширения, κ – модуль теплопроводности.

В соответствии со структурой определяющих соотношений (1) в неоднородном материале (Рисунок 155) введем “быстрые” и “медленные” переменные, связанные операцией дифференцирования сложной функции, и набор параметров, определяющий все нелинейные зависимости в соотношениях (1):

$$\xi = x/\varepsilon, \quad x = (x_1, x_2, x_3), \quad \frac{\partial}{\partial x_k} = \varepsilon^{-1} \frac{\partial}{\partial \xi_k} + D^k, \quad D^k = \frac{\partial}{\partial x_k}, \quad (2)$$

$$p = \{T, x_1, x_2, x_3\}$$

Уравнения равновесия и теплового баланса для (1) переписываются в дивергентном виде с матричными коэффициентами, зависящими от быстрых переменных и набора параметров следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(A_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x_j} - \boldsymbol{\alpha}_j T \right) \right) + \mathbf{F} &= 0, \\ \rho(\xi) c(\xi) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + h, \end{aligned} \quad (3)$$

$$A_{ij} = \{a_{ijkl}\}, \quad a_{ijkl} = c_{ijkl}, \quad \boldsymbol{\alpha}_i = \{\alpha_{ij}\}, \quad \mathbf{u} = \{u_i\}, \quad \mathbf{F} = \{F_i\},$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость материала (зависящие от температуры и пространственных координат). Контактные условия (в данном случае – условия идеального контакта) также переписываются в дивергентном виде с матричными коэффициентами (где $[\bullet]$ обозначает скачок значений на межфазных границах):

$$[\mathbf{u}] = \left[A_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x_j} - \boldsymbol{\alpha}_j T \right) n_i \right] = 0, \quad [T] = \left[\kappa_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial T}{\partial x_j} n_i \right] = 0 \quad (4)$$

Решение уравнений (3), (4) в периодической среде с размером ячейки $\mathcal{E}$ ищется в виде асимптотических разложений по функциям быстрых и медленных переменных с учетом параметрических зависимостей:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(x) &= \hat{\mathbf{u}}(\xi, x, \mathbf{p}) = \sum_{l=0}^{\infty} \varepsilon^l \mathbf{u}^{(l)}(\xi, x, \mathbf{p}), \\ T(x) &= \hat{T}(\xi, x, \mathbf{p}) = \sum_{l=0}^{\infty} \varepsilon^l T^{(l)}(\xi, x, \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (5)$$

При этом по быстрым переменным выполняется условие периодичности с периодом равным 1, поскольку материальные коэффициенты в определяющих уравнениях (1) при фиксированном $\mathbf{p}$ фактически зависят только от ξ и являются периодическими. Таким образом, для анализа уравнений (3), (4) применяется асимптотический анализ как вариант метода многих масштабов.

Быстрые и медленные переменные разделяются в процессе построения асимптотики с помощью формулы дифференцирования зависимых переменных (2); при этом уравнения (3), (4) преобразуются в свои асимптотические ряды с учетом зависимости набора параметров $\mathbf{p}$ от исходных величин. Условие равенства нулю (3), (4) с точностью до членов порядка $O(\varepsilon)$ определяет структуру асимптотических разложений (5) первого порядка:

$$\mathbf{u}^{(0)}(\xi, x, \mathbf{p}) = \mathbf{V}(x), \quad T^{(0)}(\xi, x, \mathbf{p}) = T_0(x), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{(1)}(\xi, x, \mathbf{p}) = N_{i_1}(\xi, \mathbf{p}) D^{i_1} \mathbf{V}(x) + \mathbf{m}(\xi, \mathbf{p}) T_0(x), \\ T^{(1)}(\xi, x, \mathbf{p}) = n_{i_1}(\xi, \mathbf{p}) D^{i_1} T_0(x). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $N_{i_1}(\xi, \mathbf{p})$, $\mathbf{m}(\xi, \mathbf{p})$ и $n_{i_1}(\xi, \mathbf{p})$ функции быстрых переменных в параметрическом пространстве (соответственно матричные, векторные и скалярные), периодические с периодом 1.

Форма представления (6) предопределяет равенство нулю членов порядка $O(\varepsilon^{-2})$, а форма представления (7) определяет уравнения для функций быстрых переменных в классе периодических функций их условия равенства нулю членов порядка $O(\varepsilon^{-1})$:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(A_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial (N_{i_1} + \xi_{i_1} E)}{\partial \xi_j} \right) \Big|_{=0} = \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(A_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial (\underline{\mathbf{m}} - \boldsymbol{\alpha}_j)}{\partial \xi_j} \right) \Big|_{=0}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(\kappa_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial (n_{i_1} + \xi_{i_1})}{\partial \xi_j} \right) \Big|_{=0}. \quad (9)$$

Аналогично из контактных условий на межфазных поверхностях получаем граничные условия сопряжения для функций быстрых переменных, которые в случае идеального контакта имеют следующий вид:

$$\left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial(N_{i_1} + \xi_{i_1} E)}{\partial \xi_j} n_i \end{array} \right] = 0 \\ A_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \end{array} \right] , \quad \left[\begin{array}{c} \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \xi_j} n_i \end{array} \right] = 0 \quad (10)$$

$$\left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial(n_{i_1} + \xi_{i_1})}{\partial \xi_j} n_i \end{array} \right] = 0 \\ \kappa_{ij}(\xi, \mathbf{p}) \end{array} \right] . \quad (11)$$

Требование разрешимости уравнений для периодических функций быстрых переменных приводит к необходимости “усреднения” по периоду всех членов асимптотического равенства в разложении уравнений с быстро осциллирующими коэффициентами. В результате для функций медленных переменных $\mathbf{V}(x)$ и $T_0(x)$ получается асимптотическое уравнение, в котором все члены, зависящие от быстрых переменных, заменяются их средними по периоду:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(A_{ik}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial(N_j + \xi_j E)}{\partial \xi_k} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x_j} + A_{ik}(\xi, \mathbf{p}) \left(\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \xi_k} - \alpha \right) T \right) + F = 0 \quad (12)$$

$$\rho(\xi, \mathbf{p}) c(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa_{ik}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial T}{\partial \xi_k} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + h. \quad (13)$$

Здесь m означает среднее значение по объему представительной ячейки (среднее по периоду).

Форма представления уравнений (12), (13) имеет вид усредненных уравнений термоупругости с эффективными характеристиками, определяемыми функциями быстрых переменных в параметрическом пространстве:

$$\hat{A}_{ij} = A_{ik}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial(N_j + \xi_j E)}{\partial \xi_k}, \quad (14)$$

$$\hat{\alpha}_{ij} = -\hat{A}_{ij}^{-1} A_{ik}(\xi, \mathbf{p}) \left(\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \xi_k} - \alpha \right),$$

$$\left. \hat{\kappa}_{ij} = \kappa_{ik}(\xi, \mathbf{p}) \frac{\partial (n_j + \xi_j)}{\partial \xi_k} \right\rangle, \hat{C} = \rho(\xi, \mathbf{p}) c(\xi, \mathbf{p}) . \quad (15)$$

Здесь $\hat{A}_{ij} = \left\{ \hat{a}_{ijkl} \right\}$ – эффективная матрица упругости структурно-

неоднородного материала, $\hat{\alpha}_j = \left\{ \hat{\alpha}_{ij} \right\}$ – эффективный тензор теплового расширения, $\hat{\kappa}_{ij}$ – эффективный тензор теплопроводности, $\hat{C}$ – эффективная теплоемкость структурно-неоднородного материала.

Уравнения (14), (15) вместе с (8) – (11) определяют численный алгоритм нахождения эффективных характеристик структурно-неоднородного материала. В этих характеристиках сохраняется зависимость от параметра $\mathbf{p}$, поэтому формулы (14), (15) определяют алгоритм нахождения нелинейной диаграммы состояния эффективного материала. При решении задачи внешнего уровня в усредненных уравнениях дивергентного вида (12), (13) для функций медленных переменных, параметр $\mathbf{p}$ заменяется на его усредненное значение:

$$\mathbf{p} = \{T_0, x_1, x_2, x_3\}, T_0(x) = T(\xi, x, \mathbf{p}) .$$

Математически строго обосновывается, что асимптотика первого порядка (5)–(7) удовлетворяет нелинейному уравнению термоупругости и контактными условиям на межфазных границах с точностью $O(\varepsilon)$. С этой же точностью асимптотическое решение аппроксимирует напряжения, деформации и тепло потоки, т.е. воспроизводит эти физические поля с учетом внутренней микроструктуры неоднородного материала.

Разделение быстрых и медленных переменных, формализованное в уравнениях (8)–(11) и (12), (13) представляет собой, по сути, двухуровневую схему решения задач термоупругости для неоднородных материалов с многослойным дисперсным или волокнистым наполнителем. На первом этапе решается задача для функций быстрых переменных, и определяются эффективные характеристики периодической среды, на втором этапе решается полноценная задача термоупругости с нелинейными характери-

ками. Каждая из этих задач имеет свою специфику и решается своим набором численных средств.

Для решения внешней (усредненной) задачи термоупругости применяется метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ABAQUS; необходимые нелинейные диаграммы для эффективных термомеханических модулей рассчитываются помощью функций быстрых переменных. Для решения внутренней задачи (8)–(11) в классе периодических функций, имеющих свою специфику, развивается отдельный аналитический метод, основанный на точных аппроксимациях решения в подобластях-блоках (метод ВСМ – Block Computational Method) [9–13]. Этот метод инкорпорируется [16] в конечно-элементный комплекс ABAQUS для удобства решения задачи внешнего уровня в рассматриваемой двухуровневой схеме.

Аналитический метод решения задачи на ячейке

Для задачи на ячейке (8)–(11) применяется дополнительный анализ исходных уравнений термоупругости с помощью теоремы Гельмгольца о представлении векторного поля в виде суперпозиции градиента скалярного и ротора векторного потенциала. По результатам этого анализа решение представляется через вспомогательные потенциалы (векторные и скалярные), удовлетворяющие уравнениям Лапласа и Пуассона. Это позволяет применить для всех уравнений один и тот же алгоритм удовлетворения контактных условий на межфазных границах многослойного включения (Рисунок 157) с помощью радиальных множителей $\chi(r)$ – функций, зависящих от сферической или цилиндрической радиальной координаты, и построить полную систему функций, удовлетворяющую необходимым контактным условиям, применяемую для решения задачи на ячейке в аналитическом виде путем разложения вспомогательных потенциалов в ряд. Для задач (8)–(11) наиболее важным является строгое выполнение контактных условий на границе межфазных зон, которые, как мы предполагаем, имеют сферическую или цилиндрическую форму. Аналогичная ситуация справедлива и для уравнений теплопроводности в структурно-неоднородной среде с многослойными включениями.

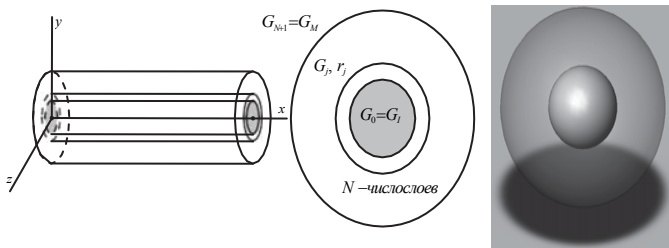


Рисунок 157 – Модель многослойного включения
(сферической или цилиндрической формы)

Для построения решений в методе асимптотического усреднения аппроксимирующая система функций строится с помощью представления Папковича-Нейбера [15]:

$$U(P) = \frac{\mathbf{f}(P)}{\mu} + \frac{\nabla(\phi - \mathbf{r} \cdot \mathbf{f})}{4\mu(1-\nu)}, \quad \nabla^2 \mathbf{f}(P) + \mathbf{F} = 0, \quad \nabla^2 \phi(P) + \mathbf{r} \cdot \mathbf{F} = 0, \quad (16)$$

где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор из начала координат в точку в пространстве $P = (x_1, x_2, x_3)$, $\mathbf{F}$ – объемные силы в теле, $\mathbf{f}$ – векторный потенциал, ϕ – скалярный потенциал (при отсутствии объемных сил это гармонические функции), μ – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона материала.

Указывается такая форма представления вспомогательных потенциалов на основе гармонического полинома $f_n^{(0)}(P)$ и радиальных множителей $\chi_n(r) = r^{-2n-1}$ для сферической и $\chi_n(r) = r^{-2n}$ для цилиндрической симметрии, что решение имеет полиномиальную асимптотику на бесконечности и аналитически точно удовлетворяет контактными условиям на межфазных границах [15]. Такая задача для уединенного многослойного включения с полиномиальной асимптотикой на бесконечности называется обобщенной задачей Эшелби по аналогии с задачей Эшелби в методе самосогласованного усреднения трех тел [8].

Построенные базисные системы функций используются в блочном методе наименьших квадратов [9-13] для аппроксимации решения задачи на ячейке периодичности с многослойным включением сферической или цилиндрической сфероидальной формы. Для этого область решения разби-

вается на множество блоков в соответствии с фазами материала G_I , G_J , G_M (Рисунок 157) и аппроксимация условий периодического скачка в задаче на ячейке периодичности (8)–(11) осуществляется с помощью функционала метода наименьших квадратов, что приводит к блочной системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов в разложениях по базисной системе функций. При этом рассматривается два типа функционалов, которые приводят к симметричной и несимметричной системе уравнений (см. [13]).

Аппроксимирующая система функций первого порядка используется в самосогласованном методе Эшелби-Кристенсена для оценки эффективных характеристик методом нескольких сферических или цилиндрических тел. Этот метод является облегченным вариантом задачи на ячейке периодичности, когда можно пренебречь взаимодействием включений, т.е. когда объемная концентрация включений достаточно мала. Метод Эшелби-Кристенсена распространяется на нелинейные уравнения термоупругости, и легко реализуется в ABAQUS в виде пользовательского интерфейса по технологии UMAT, что предполагает реализацию всех алгоритмов вычисления эффективных жесткостных и прочностных характеристик на языке Fortran-90.

Подключение эффективных характеристик осуществляется на уровне модификации входного файла (*.inp) конечно-элементной модели. Описание исходных параметров для вычисления эффективных характеристик (свойства материала включения E_I , ν_I , промежуточных слоев E_J , ν_J , матрицы E_M , ν_M , объемной доли включений c_0 и относительных радиусов межфазных слоев $\hat{l}_j = r_j / r_0$) осуществляется при помощи стандартного ключа *USER MATERIAL и включает набор дополнительных параметров. Подключение материала осуществляется стандартным образом. Модификация входного файла затрагивает только два места, т.е. требует минимум изменений. Реализация метода Кристенсена - Эшелби в ABAQUS позволяет организовать в удобной форме решение нелинейного усредненного уравнения термоупругости (12), (13).

Примеры определения эффективных характеристик композитов и геоматериалов

Механические характеристики мерзлого грунта

Рассматривается периодическая среда, образованная из ледяной матрицы с характеристиками $E_M = 6 \text{ GPa}$, $\nu_M = 0.3$ (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), наполненная минеральными частицами сферической формы с характеристиками $E_I = 50 \text{ GPa}$, $\nu_I = 0.1$, A – расстояние между центрами. Около каждой частицы образован слой связанной воды некоторой ширины l , предполагается, что он характеризуется объемным модулем $K_L = 1000 \text{ GPa}$ и коэффициентом Пуассона $\nu_L = 0.49999$, что соответствует модулю сдвига $\mu_L = 0.02 \text{ GPa}$. Эффективные характеристики такой среды рассчитываются методом асимптотического усреднения на основе точного решения задачи на ячейке периодичности с учетом контактных условий на межфазном слое. На Рисунке 158 представлена зависимость эффективного модуля Юнга E_H от объемной концентрации включений c_0 при разной ширине межфазного слоя $l/A = 0.1$ и $l/A = 0.02$. В зависимости от ширины слоя связанной воды диаграмма зависимости качественно изменяется: при относительно большом слое связанной воды модуль Юнга падает с ростом концентрации минеральных частиц (Рисунок 158а), а при относительно малом – растет (Рисунок 158б).

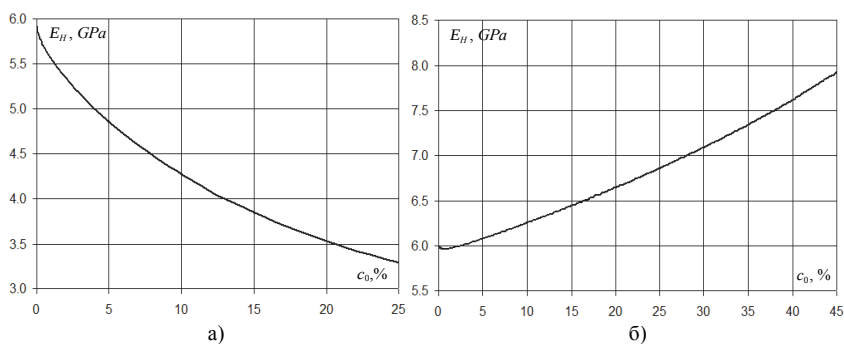


Рисунок 158 – Эффективный модуль Юнга мерзлого грунта:

а) $l/A = 0.1$; б) $l/A = 0.02$

На Рисунке 159 приведено распределение напряжений σ_z в среднем сечении $\{y = 0\}$ в ячейке с включением при одноосном растяжении с единичной средней деформацией $\varepsilon_z = 1$ при $r/A=0.3$ и $r/A=0.38$ (r – радиус частиц); на Рисунке 160 приведено распределение компоненты перемещений u_z при той же деформации.

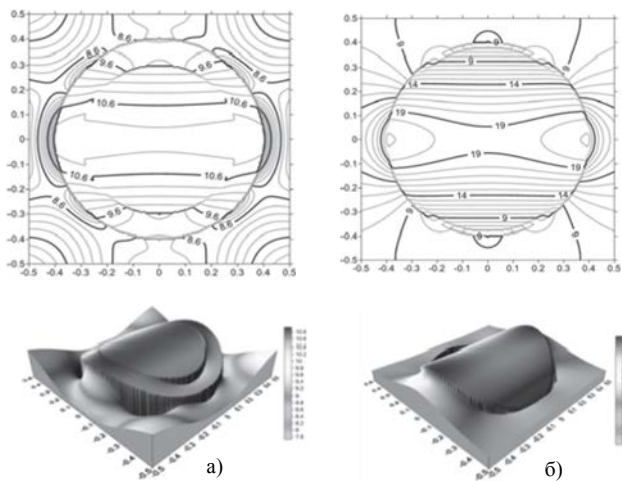


Рисунок 159 – Напряжения σ_z в ячейке с включением:

а) $l/A = 0.1$; б) $l/A = 0.02$

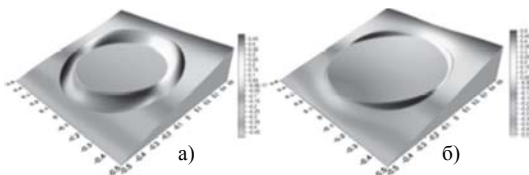


Рисунок 160 – Перемещения u_z в ячейке с включением:

а) $l/A = 0.1$; б) $l/A = 0.02$

Моделирование масштабного эффекта усиления в нанокompозитах

Используя решения, построенные с помощью систем функций для уединенного включения с точным учетом контактных условий на границе

межфазного слоя, можем эффективно определить зависимости характеристик композиционных материалов от параметров межфазного слоя. Следует отметить, что современные композиты обладают необычными свойствами аномального усиления прочностных характеристик при использовании наполнителей наномасштабного размера. Эти эффекты объясняются [17–19], помимо прочего, способностью нановключений модифицировать свойства матрицы с образованием дополнительного межфазного слоя около частиц, имеющего при гомогенном распределении частиц в композите значительное влияние на эффективные характеристики материала в целом. Однако гомогенное состояние трудно обеспечить технологически, и неизбежная агрегация частиц в более крупные агломераты (с ростом объемной концентрации) уменьшает усиливающий эффект.

В качестве примера, моделирующего масштабный эффект усиления при сверхмалых объемных долях нановключений, на Рисунке 161 представлен результат вычисления эффективного модуля Юнга E_H для дисперсного композита при постоянной ширине межфазного слоя $l_1 = 0.2 \text{ мкм}$ и при условии изменения радиуса частиц в зависимости от объемной концентрации c_0 , что моделирует процесс их агломерации.

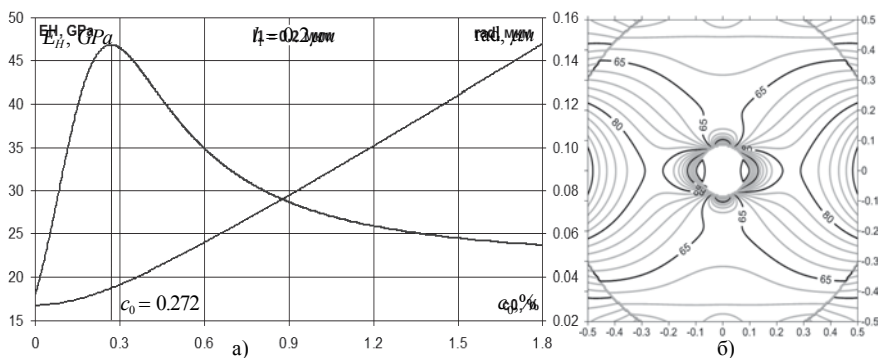


Рисунок 161 – Масштабный эффект усиления модуля Юнга в модели структурно-неоднородного материала с межфазным слоем

Параметры матрицы, включений и межфазного слоя: $E_M = 18 \text{ GPa}$, $\nu_M = 0.33$, $E_I = 380 \text{ GPa}$, $\nu_I = 0.2$, $E_L = 57.5 \text{ GPa}$, $\nu_L = 0.3$. На Ри-

сунке 161a представлена зависимость эффективного модуля Юнга и приведенного радиуса агрегированных частиц от концентрации. На Рисунке 161б представлено распределение растягивающих напряжений при единичной деформации в ячейке периодичности при максимальном значении эффективного модуля, достигаемого при $c_0 = 0.272\%$. В рассматриваемой модели наблюдается ярко выраженный масштабный эффект усиления модуля Юнга при малой концентрации включений.

Сравнение метода асимптотического усреднения и самосогласованного метода трех сферических тел

Метод Эшелби-Кристенсена [8] оценки эффективных характеристик неоднородных материалов (самосогласованный метод трех сферических тел) основан на точном аналитическом решении вспомогательной задачи для уединенного включения с дополнительным межфазным слоем в однородной матрице. Построенные в данной работе системы функций содержат это решение в качестве подсистемы первого порядка. Для материалов с малой объемной долей включений решение задачи на ячейке периодичности в методе асимптотического усреднения определяется (в первом приближении) этой же подсистемой функций первого порядка. При вычислении модуля сдвига μ_H в методе Эшелби-Кристенсена принцип согласования энергии формулируется для деформации чистого сдвига, определяемого тензором $\varepsilon_{11} = -\varepsilon_{22} = 1$. Однако, некоторая неопределенность метода связана с тем, что сдвиговые характеристики можно было бы определять и при любой другой девиаторной деформации, например, при деформации простого сдвига $\varepsilon_{12} = 1$.

В связи с этим представляет интерес сопоставить результаты расчетов эффективного модуля разными методами: трех сферических тел и асимптотическим методом, имеющим строгое математическое обоснование и оценку [3–6]. Неоднозначность последнего в определении модуля сдвига связана с тем, что он, в отличие от метода Эшелби-Кристенсена, определяет усредненный материал как ортотропный с тремя независимыми компонентами тензора жесткости c_{1111} , c_{1122} и $c_{1212} = \mu_H$, а учитывая, что материал предполагается изотропным модуль сдвига определяется по

формуле $c_{1212} = \mu_H = 0.5(c_{1111} - c_{1122})$. На Рисунке 162 представлены результаты расчета эффективного модуля сдвига мерзлого грунта (смеси льда и песка – мёрзлый песок базальной структуры) с характеристиками $E_M = 6 \text{ GPa}$, $\nu_M = 0.3$, $E_I = 50 \text{ GPa}$, $\nu_I = 0.1$ четырьмя способами: на основе чистого и простого сдвига в методе трех сферических тел, а также исходя из гипотезы изотропного материала на основе компонент тензора жесткости c_{1111} , c_{1122} , и для ортотропного материала $c_{1212} = \mu_H$ в методе асимптотического усреднения. Результаты расчетов показывают некорректность в определении μ_H на основе простого сдвига, а также сильное расхождение при больших концентрациях включений; при малых значениях $c_0 \leq 10\%$ погрешность усреднения представленными методами не превышает 3%.

Моделирование гиперупругих материалов

В настоящем разделе сформулирована схема параметрического усреднения гиперупругих композитных материалов, которая реализуется в необходимости решения двух основных задач на ячейке периодичности для функций быстрых переменных первого порядка при одноосном растяжении и чистом сдвиге образца полимерной матрицы с включением. На основе численного решения этих задач определяются эффективные характеристики механических свойств композитного материала: модуль Юнга E и модуль сдвига G , как средние значения компонент тензора напряжений. Для геометрически нелинейных гиперупругих материалов параметром в методе асимптотического усреднения является удлинение образца при растяжении или деформациях чистого сдвига.

Масштабные эффекты, обусловленные наличием межфазного слоя, моделируются непосредственно, путём введения в модель промежуточного межфазного слоя для дисперсных включений (Рисунок 165, 166). Геометрические и физические параметры межфазного слоя определяются на основе экспериментальных данных с использованием методов фрактального анализа [17, 18] межфазной зоны между включением и матрицей. Такой подход использовался, в частности, в работе [19] для классической модели упругого материала, где в зависимости от размера включений с перемен-

ным межфазным слоем был впервые численно смоделирован масштабный эффект усиления жесткостных характеристик композитного материала, хорошо согласующийся с экспериментальными данными.

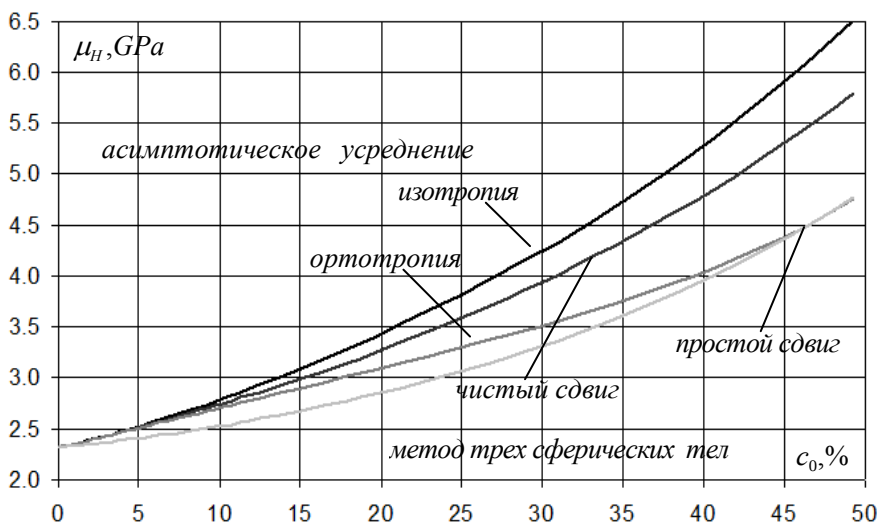


Рисунок 162 – Эффективный модуль сдвига в методе асимптотического усреднения и в модели трех сферических тел

В качестве матрицы композитного материала рассматривается несжимаемый гиперупругий эластомер, который описывается в главных осях тензора деформаций потенциалом упругой энергии U , зависящей от элементарных относительных удлинений $\delta_i = (d x'_i - d x_i) / d x_i$ и от первого инварианта тензора деформаций $I = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$, где $\lambda_i = 1 + \delta_i$. В настоящей работе потенциал деформаций [20] представлен в экспоненциальной форме, позволяющей эффективно учитывать эффект нелинейного изменения жесткости материала при растяжении (эффект Пейна):

$$U = E_1 I_1^{-3} + \frac{E_2}{E_3} \sqrt{I_1 - 3} + \frac{E_2}{E_3} \left(e^{-E_3 \sqrt{I_1 - 3}} - 1 \right), \quad (16)$$

где коэффициенты E_1 , E_2 и E_3 вычисляются на основе экспериментальных данных по растяжению эластомерного материала, используемого в композите с шунгитовым наполнителем.

В качестве образцов исходного материала рассматривались полоски ненаполненного бутадиен-стирольного каучука, которые подвергались одноосному растяжению (см. Рисунок 163) на испытательном стенде. В результате, в качестве исходных данных для аппроксимации потенциала (16), фигурирует таблица $\{\lambda_i, \sigma_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, где λ_i – относительное удлинение,

σ_i – соответствующее этому удлинению техническое напряжение, т.е. сила растяжения, поделенная на исходную площадь сечения (без учета площади сечения при одноосной деформации).

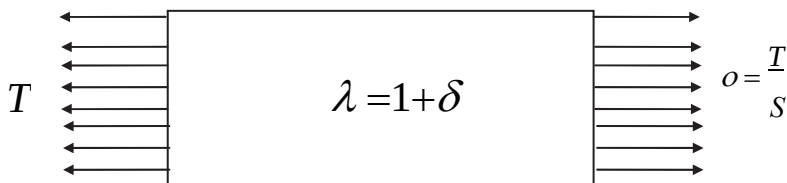


Рисунок 163 – Схема одноосного растяжения образца гиперупругого материала

Соответственно при одноосном растяжении инвариант I_1 и технические напряжения, соответствующие потенциалу (16), раскрываются следующим образом:

$$I_1 = \lambda_i^2 + 2/\lambda_i, \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{\partial U}{\partial \lambda} \bigg|_{\lambda=\lambda_i} = \left(\frac{E_1}{2} - \frac{E_3}{\lambda_i^2} \sqrt{\lambda_i^2 + 2/\lambda_i - 3} \right) \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right).$$

При аппроксимации исходных данных варьируются параметры E_1 , E_2 и E_3 ; поскольку из них два первых входят в формулу (17) линейно, то они определяются методом наименьших квадратов при фиксированном E_3 .

А для безразмерного параметра E_3 , отвечающего за скорость установления жесткости при растяжении имеем задачу нелинейного программирования в одномерном пространстве с целевой функцией δ – относительной погрешностью среднеквадратичной аппроксимации. Такая задача легко решается множеством различных методов, в том числе и методом простого перебора параметра E_3 на некоторой сетке.

В результате аппроксимации исходного материала – ненаполненного бутадиен-стирольного каучука, были получены следующие значения коэффициентов в потенциале энергии: $E_1 = 0.2277 \text{ MPa}$, $E_2 = 0.3595 \text{ MPa}$, $E_3 = 1.2495$; относительная погрешность аппроксимации экспериментальных данных составила $\Delta = 1.17\%$. Заметим, что E_1 имеет физический смысл начального модуля жесткости, а E_2 – разности между начальным и модулем при «бесконечной деформации».

На Рисунке 164 представлена диаграмма изменения напряжений в зависимости от относительного удлинения δ при одноосном растяжении в направлении оси Z ; кружочками обозначены экспериментальные данные.

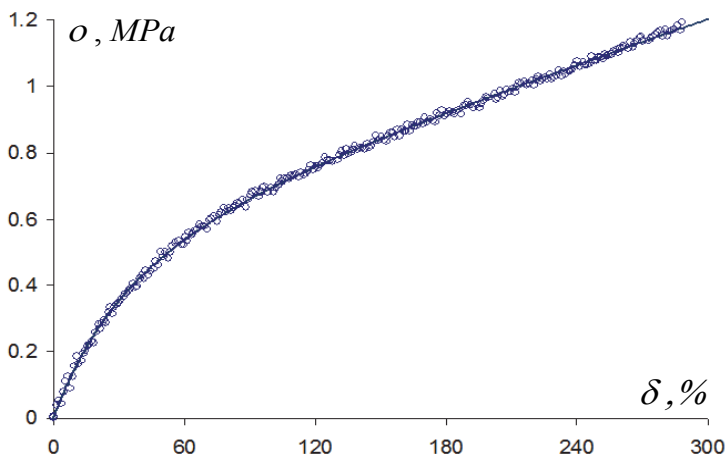


Рисунок 164 – Аппроксимация диаграммы одноосного растяжения бутадиен-стирольного каучука:

○ результаты экспериментов, — аппроксимирующая кривая

Особенности реализации решения задачи на ячейке методом конечных элементов

Согласно методике параметрического усреднения эффективные механические характеристики, определяющие тензор жёсткости $\hat{c}_{ijkl}$, где $i, j, k, l = 1, 2, 3$, находятся как средние по периоду напряжения, порождаемые периодическими функциями быстрых переменных в задаче на ячейке периодичности при определенном виде деформациях наполненного образца гиперупругого материала.

В качестве наполнителя используются дисперсные частицы минерала шунгит, описываемые в рамках изотропной упругой модели с модулем Юнга $E = 1.5 GPa$ и коэффициентом Пуассона $\nu = 0.3$. Мы предполагаем, что в рассматриваемой модели частицы наполнителя имеют сферическую форму и распределены в материале периодически и равномерно. Концентрация частиц наполнителя определяется коэффициентом объемного наполнения c_0 , который принимает значение $c_0 = 2.5\%$ для частиц микрошунгита и $c_0 = 4\%$ для частиц наношунгита. В случае наполнения матрицы частицами наношунгита вокруг включений выделяется промежуточная межфазная зона сферической формы и заданной относительной ширины l_0/R , определяемой экспериментальным образом, где R – радиус включений; рассматривались следующие значения для нановключений: $l_0/R = 0.39$, $R = 85 \text{ нм}$; модуль Юнга межфазного слоя принимался равным $E = 1.0 GPa$, а коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. Для микрошунгита ($R = 120 \text{ нм}$) в расчетах полагалось, что межфазный слой отсутствует.

Анализируя задачу на ячейке для включений сферической формы, приходим к выводу, что для определения модуля Юнга необходимо решать задачу об одноосном растяжении ячейки из несжимаемого материала с включением при сохранении параллельности боковых граней, и в качестве расчетной области можно взять $1/8$ часть ячейки. Соответственно, для определения модуля сдвига необходимо решать задачу на $1/8$ части ячейки периодичности при условии параллельности боковых граней и при деформациях чистого сдвига, сохраняющих объем каждого элементарного

кубика в главных осях деформации. Соответствующие расчётные схемы представлены на Рисунках 165, 166.

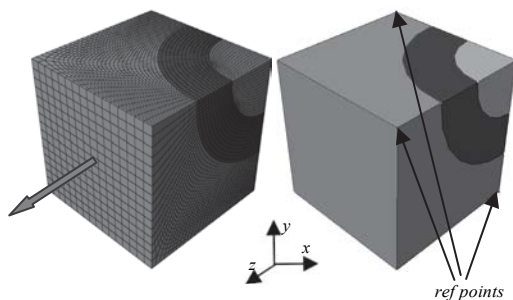


Рисунок 165 – Расчётная схема для вычисления эффективного модуля Юнга

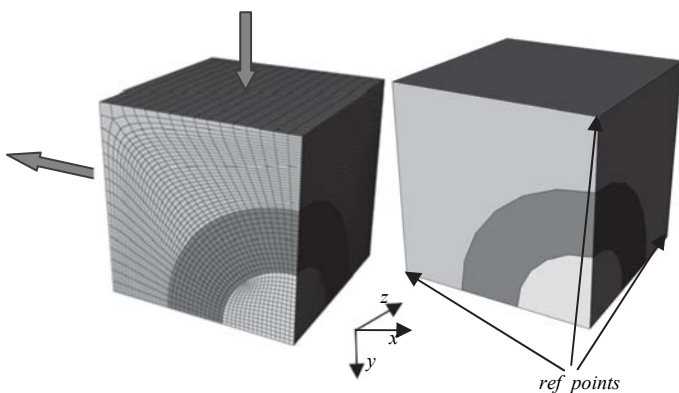


Рисунок 166 – Расчётная схема для вычисления эффективного модуля сдвига

Сформулируем краевые условия для задач одноосного растяжения и чистого сдвига с условиями периодичности в случае включений сферической формы. Специфика больших деформаций заключается в том, что функции быстрых переменных надо рассчитывать на ячейке с переменным периодом, зависящем от приложенной нагрузки. В связи с этим грани, проходящие через центр включения, закрепляются условием $u_n = 0$, где

u_n – нормальная составляющая вектора перемещений, а остальная часть граней остается свободной от условий закрепления. При этом передняя грань по оси z перемещается при одноосном растяжении (см. Рисунок 165) на расстояние, соответствующее относительному удлинению величиной δ :

$$u_z = \delta A, \quad z = A, \quad (18)$$

где A – половина расстояния между центрами включений (т.е. длина $1/8$ части ячейки с включением). При деформации чистого сдвига задается одновременное, согласованное и сохраняющее общий объем ячейки перемещение свободных граней по оси x и y (см. Рисунок 166):

$$u_x = -\delta A, \quad x = -A, \quad u_y = \frac{\delta A}{1+\delta}, \quad y = -A. \quad (19)$$

Условие периодичности реализуется при выполнении (18), (19) как требование свободного перемещения оставшихся граней при условии сохранения их параллельности. Для того, чтобы обеспечить это условие были введены контрольные точки (reference points), см. Рисунок 165, 166, и в расчетную конечно-элементную схему было добавлено ограничение: $x_i = x_{ref}, \quad y_i = y_{ref}, \quad z_i = z_{ref}$, для узлов конечно-элементной сетки на свободных гранях.

Результаты численного моделирования композитов на основе несжимаемой матрицы

В соответствии с изложенной схемой были проведены расчёты диаграммы напряжений при одноосном растяжении и деформациях чистого сдвига, и на основе этих диаграмм вычислены эффективные модуль Юнга $\hat{E}$ и модуль сдвига $\hat{G}$. Диаграмма напряжений представляет собой зависимость средних растягивающих напряжений $\hat{\sigma}$ в случае одноосного растяжения или $\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2$ в случае деформации чистого сдвига в зависимости от параметра относительного удлинения ячейки δ ; рассмотрены объёмные концентрации включений $c_0 = 2.5\%$ (наполнение микрошунгитом) и $c_0 = 4\%$ (наполнение наношунгитом). Результаты расчётов представлены на Рисунке 166–169. На Рисунке 167 представлено распределение мик-

ронапряжений в ячейке с включением из микрошунгита ($c_0 = 2.5\%$) в условиях одноосного растяжения. На Рисунке 168 в качестве иллюстративного примера представлено распределение компоненты перемещений в ячейке с включением из наношунгита ($c_0 = 4\%$) в условиях деформации чистого сдвига.

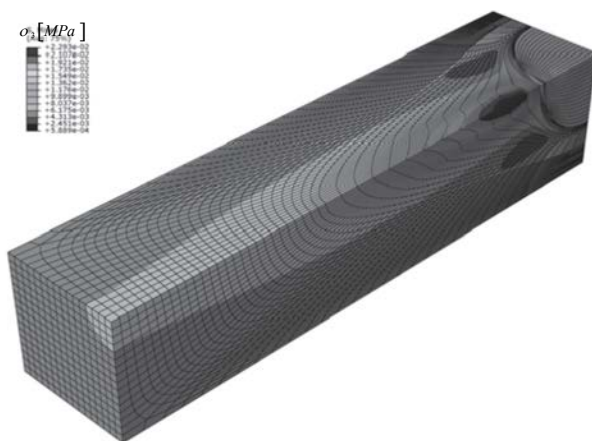


Рисунок 167 – Распределение растягивающих напряжений в ячейке с включением из микрошунгита при одноосном растяжении ($\delta = 180\%$)

Эффективный модуль Юнга $\hat{E} = \hat{E}(\delta)$ рассчитывался как производная по параметру удлинения диаграммы напряжений при одноосном растяжении: $\hat{E}(\delta) = d\hat{\sigma}_3(\delta)/d\delta$. Соответственно эффективный модуль сдвига $\hat{G} = \hat{G}(\delta)$ рассчитывался как производная по параметру удлинения при деформациях чистого сдвига: $\hat{G}(\delta) = d(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_{cp})/d(\delta_1 - \delta_2)$, где $\hat{\sigma}_{cp}$ – среднее напряжение, $\delta = \delta_1 - \delta_2$.

На Рисунке 169 представлен эффективные модуль Юнга и модуль сдвига в модели без межфазного слоя (наполнение микрошунгитом, $c_0 = 2.5\%$) в зависимости от параметра удлинения δ ; на Рисунке 169 представлены те же данные в модели с межфазным слоем (наполнение

наношунгитом, $c_0=4\%$). В модели с наношунгитом проявляется ярко выраженный эффект Пейна для механических характеристик наполненного композита (т.е. немонотонное поведение модулей жесткости в зависимости от удлинения).

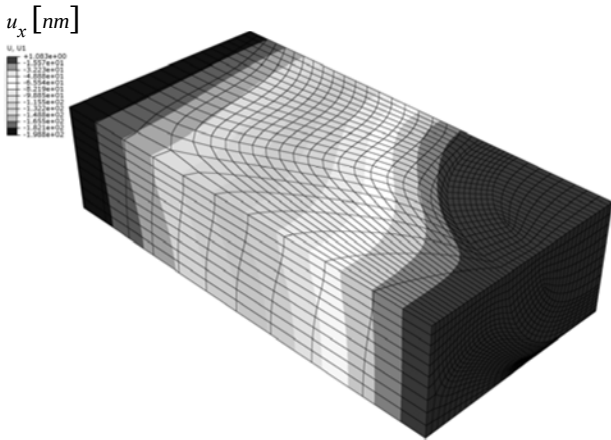


Рисунок 168 – Распределение компоненты перемещений в ячейке с включением из наношунгита при деформации чистого сдвига ($\delta=100\%$)

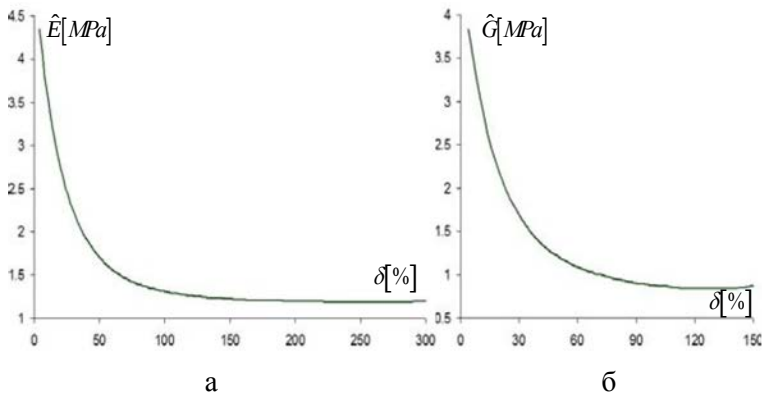


Рисунок 169 – Эффективные модули в модели с микрошунгитовым наполнителем: а) модуль Юнга $\hat{E}$; б) модуль сдвига $\hat{G}$

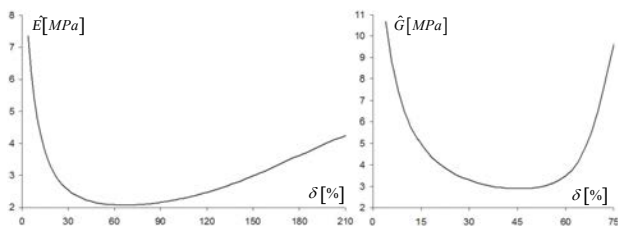


Рисунок 170 – Эффективный модули в модели с наношунгитовым наполнителем: а) модуль Юнга $\hat{E}$; б) модуль сдвига $\hat{G}$

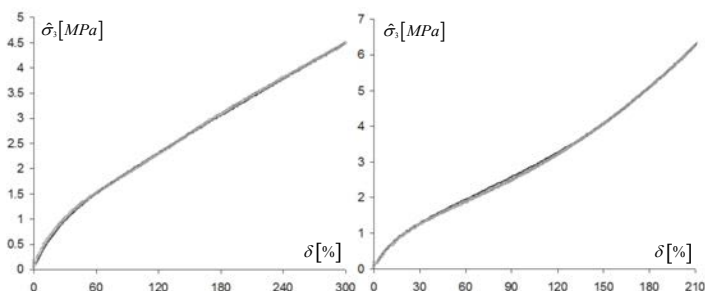


Рисунок 171 – Диаграмма растяжения (сплошная линия) в сопоставлении с экспериментальными данными ($\circ$): а) микрошунгит; б) наношунгит

Следует отметить, что на основе построенной численной модели растяжения композитного материала с микро- и наношунгитовыми включениями могут быть идентифицированы механические свойства матрицы в наполненном материале. Сопоставление численных расчетов с экспериментальными данными показывает, что в наполненном материале свойства матрицы отличаются от исходных значений. В результате сопоставления расчетных и экспериментальных данных для эластомеров с микро- и наношунгитовым наполнителем, были получены другие параметры в потенциале энергии (17): а) для микрошунгитового наполнителя без межфазного слоя $E_1 = 0.4914 \text{ MPa}$, $E_2 = 0.6205 \text{ MPa}$, $E_3 = 1.4993$; б) для наношунгитового наполнителя с межфазным слоем $E_1 = 1.0433 \text{ MPa}$, $E_2 = 1.6177 \text{ MPa}$, $E_3 = 5.6225$. На Рисунке 171 представлены соответ-

ствующие диаграммы растяжения в сопоставлении с экспериментальными данными.

Заключение

В работе представлена методика моделирования в конечно-элементном комплексе ABAQUS физических процессов в структурно-неоднородных материалах с многослойными включениями сферической и цилиндрической формы, основанная на методе параметрического усреднения нелинейных уравнений с быстро осциллирующими коэффициентами. Сформулирована и численно реализована в ABAQUS двухуровневая схема решения нелинейных задач теории упругости и теплопроводности, соответствующая разделению в решении процессов, происходящих на микро- и макроуровне (для функций быстрых и медленных переменных). На примере ряда задач, соответствующих композитам с включениями с дополнительным межфазным слоем продемонстрирована возможность эффективного прогнозирования в ABAQUS эффектов усиления и механических свойств композитов на основе матриц разного типа (льда в мерзлых грунтах базальной структуры, несжимаемого эластомера в гиперупругих материалах, металлическая матрица в промышленных композитах и т.д.).

Список литературы

1. Бахвалов Н.С. Осреднение дифференциальных уравнений с частными производными с быстро осциллирующими коэффициентами. // Доклады АН СССР. – 1975. – Т. 221(3). – С. 516–519.
2. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Параметрический метод асимптотического усреднения для нелинейных уравнений термоупругости // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т. 20(4). – С. 491–507.
3. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. – М.: Наука, 1984. – 352 с.
4. Власов А.Н., Мерзляков В.П. Усреднение деформационных и прочностных свойств в механике скальных пород. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов. 2009. – 208с.
5. Марченко В.А., Хруслов Е.Я. Краевые задачи в областях с мелкозернистой границей. – Киев: Наукова думка, 1974. – 279с.
6. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
7. Волков-Богородский Д.Б. Разработка блочного аналитико-численного метода решения задач механики и акустики // Сборник трудов школы-семинара «Композиционные материалы». – М.: ИПРИМ РАН, 2000. – С. 44–56.

8. *Волков-Богородский Д.Б.* Применение блочного аналитико-численного метода мультиполей к задачам акустики // Вестник МАИ. – 2005. – Т. 12(3). – С. 51–60.

9. *Волков-Богородский Д.Б.* О вычислении эффективных характеристик композиционных материалов с помощью блочного аналитико-численного метода // “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред”. Материалы XII Международного симпозиума. Избранные доклады. – М.: МАИ, 2006. – С. 41–47.

10. *Волков-Богородский Д.Б.* Применение аналитических расчетов на основе метода блоков в связанных задачах механики сплошных сред // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Инженерные системы – 2008», Москва, 7–11 апреля 2008. – М.: Изд-во РУДН, 2008. – С. 123–138.

11. *Волков-Богородский Д.Б., Сушко Г.Б., Харченко С.А.* Комбинированная MPI+threads параллельная реализация метода блоков для моделирования тепловых процессов в структурно-неоднородных средах // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11. – С. 127–136.

12. *Волков-Богородский Д.Б.* Аналитико-численный метод оценки эффективных характеристик структурно-неоднородных материалов // Труды X Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2011. – № 4(2). – С. 407–409.

13. *Волков-Богородский Д.Б.* Метод радиальных множителей в задачах механики неоднородных сред с многослойными включениями // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2016. – Т. 22(1). – С. 19–39.

14. *Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Яновский Ю.Г., Корнев Ю.В., Карнет Ю.Н.* Оценка механических свойств гиперэластичных композитов с малыми добавками дисперсных наполнителей // Сборник трудов Всероссийской конференции «Механика и наномеханика структурно-сложных гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы» (Москва, 23 декабря 2014 г. – 31 января 2015 г.) – М.: ИПРИМ РАН, 2015. – С. 219–225.

15. *Козлов Г.В., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н.* Механизм формирования межфазных областей в эластомерных дисперсно-наполненных композитах и его описание в рамках фрактального подхода // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2011. – Т. 17(3). – С. 351–361.

16. *Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Яновский Ю. Г.* Влияние размера включений на механические свойства эластомерных композитов // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 443(4). – С. 435–437.

**КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ
DEFORM**

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ УЧАСТКА ПШФ ЛИНИИ ТЭСА 1420

Самусев С.В., Жигулев Г.П., Фадеев В.А.

НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия

Одним из основных участков, при производстве трубы по схеме JSOE, является пресс шаговой формовки (ПШФ). На этом участке формируется конечная кривизна основной (большей) части профиля заготовки.

Процесс изгиба осуществляется следующим образом, после подгибки кромок по транспортным рольгангам заготовка поступает на ПШФ, заготовка устанавливается на бойки в рабочей зоне, примыкающей к левой подогнутой кромке, согласно предварительной разметке (Рисунок 172).

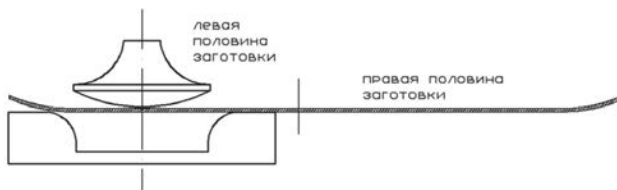


Рисунок 172 – Исходная установка трубной заготовки на ПШФ

Затем профилированный пуансон опускается на запрограммированную величину h и формирует конечную кривизну первого единичного участка (Рисунок 173а).

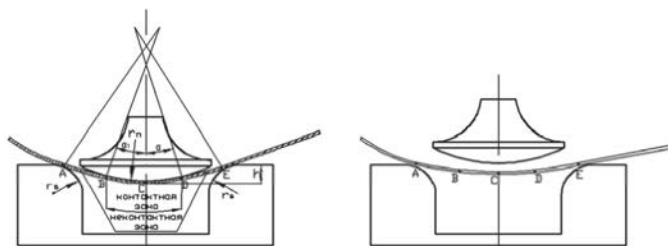


Рисунок 173 – а – формовка первого шага; б – расформовка после первого шага

Далее, после завершения операции формовки, пуансон поднимается вверх, при этом все сформованные участки (контактный и неконтактный) первого шага распруживаются на различные радиусы (Рисунок 173б).

Далее заготовку перемещают в поперечном направлении на величину шага подачи, пуансон опускается на определенную величину и формирует конечную кривизну второго участка.

Этот процесс шаговой установки и формовки повторяется до тех пор, пока не будет изогнута левая (первая) половина профиля заготовки (Рисунок 174а). Затем заготовка устанавливается в рабочей зоне для формовки участка профиля, примыкающего к другой подогнутой кромке (Рисунок 174б).

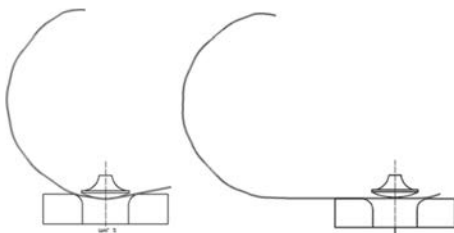


Рисунок 174 – а – формовка левой половины заготовки; б – установка правой половины заготовки на исходную позицию

Завершающим этапом формовки на ПШФ, после формовки второй половины заготовки, является центральный шаг посередине заготовки (Рисунок 175). Затем заготовка выталкивается из пресса в продольном направлении.

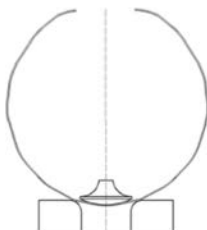


Рисунок 175 – Завершение формовки на ПШФ (последний удар-шаг)

В среде DEFORM учета нагрузки и разгрузки заготовки по шагам деформации решалась упруго - пластическая задача.

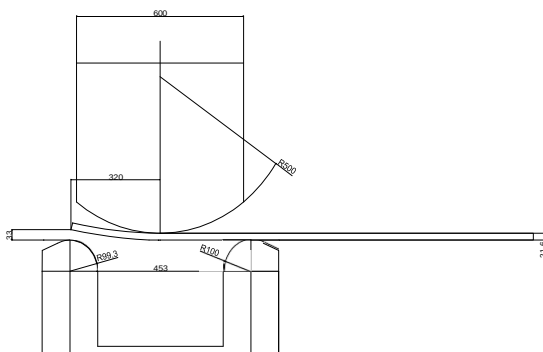


Рисунок 176 – Принципиальная схема пресс шаговой формовки в линии ТЭСА

Исходные механические и геометрические характеристики процесса представлены ниже: Марка стали (класс прочности) – К60; Предел текучести листа σ_t , МПа (Н/мм^2) – 513; Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа – 596; Относительное удлинение δ , % – 26;

Модуль упругости E , МПа – 200000; Модуль упрочнения P , МПа – 1000.

Расчет деформационного состояния ТЗ на ПШФ (первый шаг)

Согласно предложенной выше схемы работы и настройка ПШФ, с учетом разметки начальных сечений заготовки, определены значения напряженно-деформированного состояния материальных частиц по толщине заготовки при нагрузке и разгрузке. Фиксированные сечения заготовки на 1 шаге ПШФ представлены на Рисунках 177–184 для нагрузки заготовки. Данные по разгрузке заготовки после первого шага формовки представлены на Рисунках 184–185.

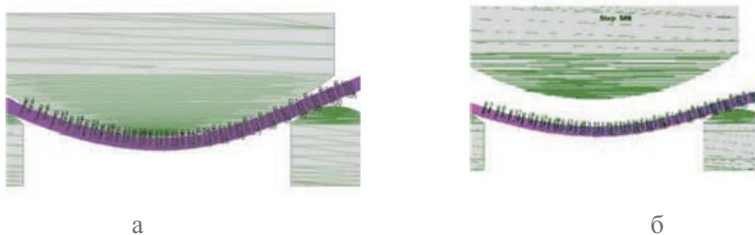
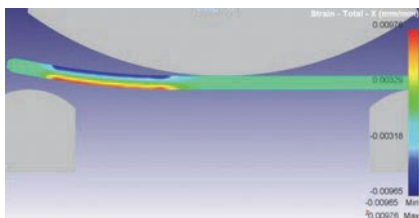
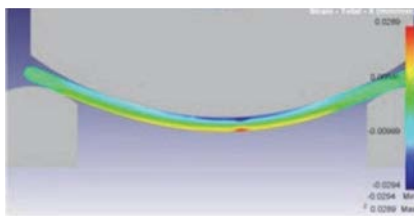


Рисунок 177 – Фиксированные сечения заготовки на 1 шаге ПШФ:

а – в конце нагрузки (шаг 283); *б* – после разгрузки (шаг 566)



Шаг 1



Шаг 283

Рисунок 178 – Цветовые диаграммы изменения ϵ_x ; шаги при нагрузке (1–283)

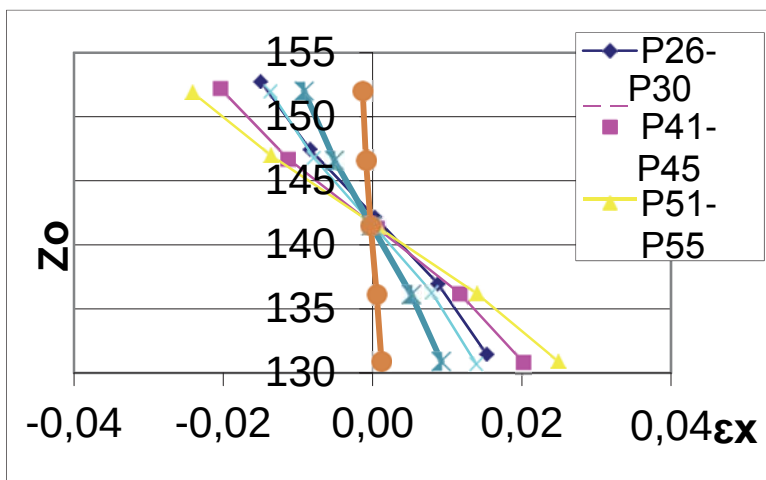
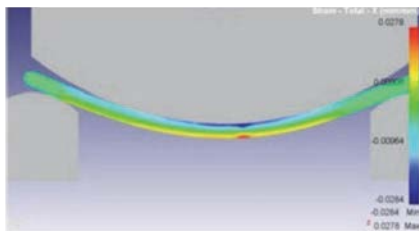
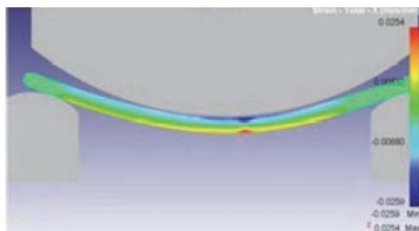


Рисунок 179 – Эпюра изменения ϵ_x для фиксированных сечений при нагрузке



Шаг 285



Шаг 370

Рисунок 180 – Цветовые диаграммы изменения ϵ_x ; шаги при разгрузке (285–370)

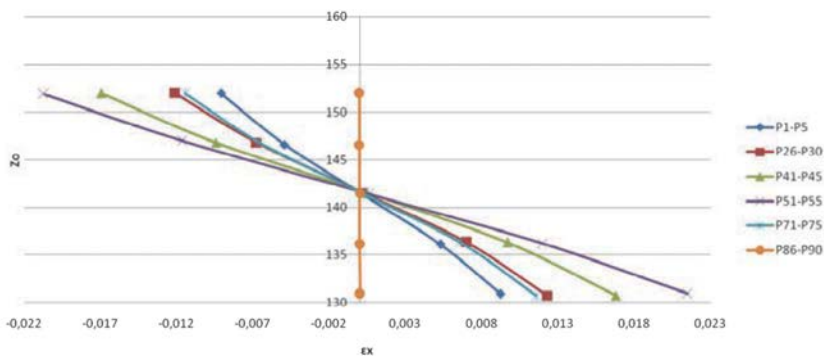
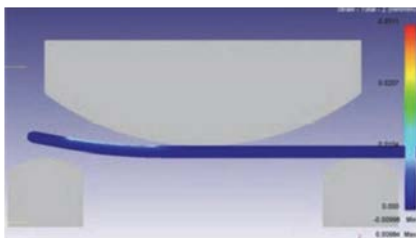
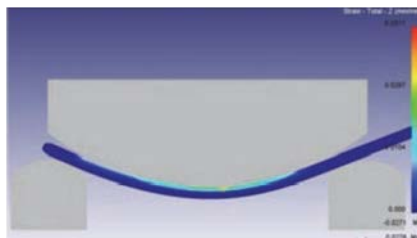


Рисунок 181 – Эпюры изменения ϵ_x для фиксированных сечений при разгрузке



Шаг 1



Шаг 283

Рисунок 182 – Цветовые диаграммы изменения ϵ_z ; шаги при нагрузке (1–283)

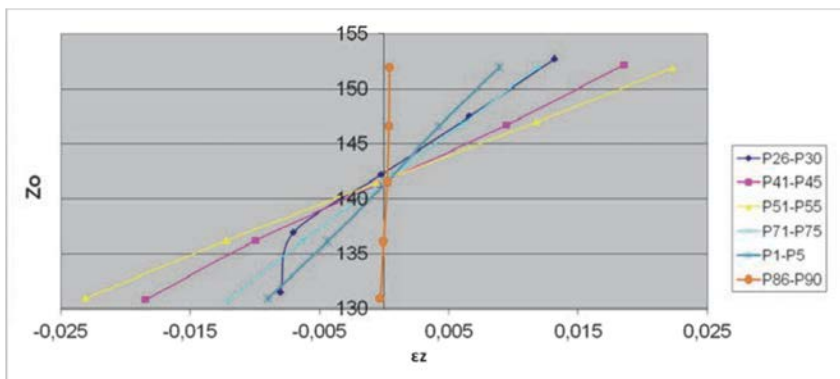


Рисунок 183 – Эпюры изменения ϵ_z для фиксированных сечений при нагрузке

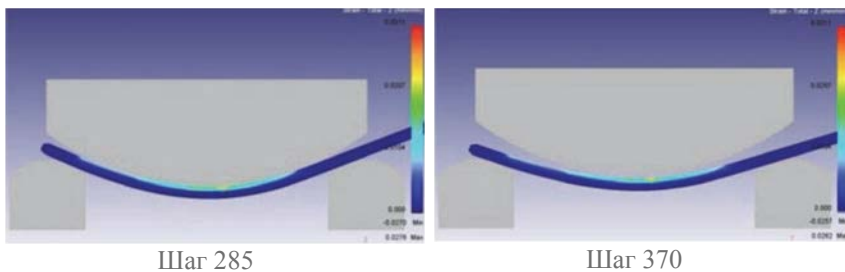


Рисунок 184 – Цветовые диаграммы изменения ε_z ; шаги при разгрузке (285–370)

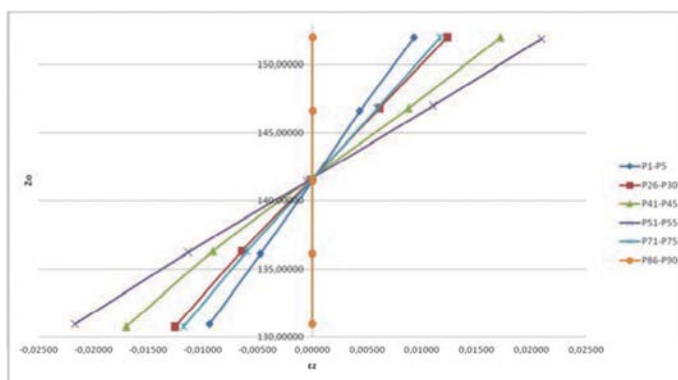


Рисунок 185 – Эпюра изменения ε_z для фиксированных сечений при разгрузке

Значения интенсивности деформаций при нагрузке и разгрузке первого шага процесса представлены на Рисунках 186–189.

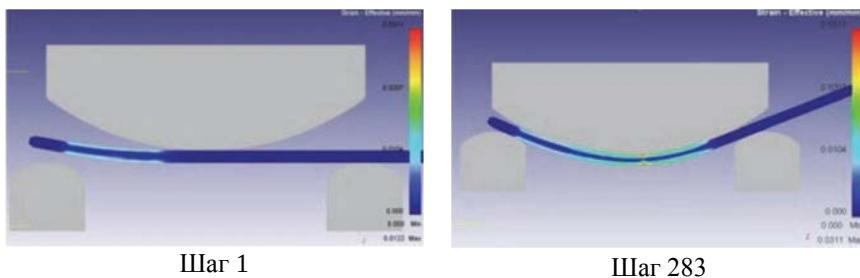


Рисунок 186 – Цветовые диаграммы изменения ε_x ; шаги при нагрузке (1–283)

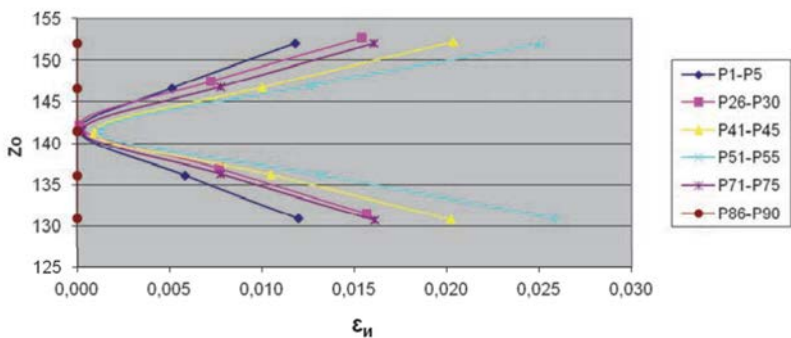
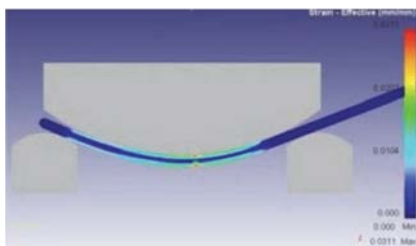
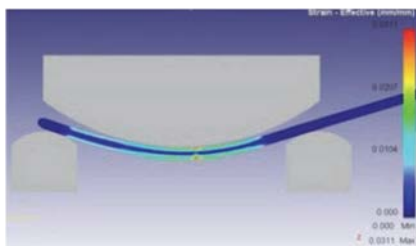


Рисунок 187 – Эпюра изменения ϵ_{II} для фиксированных сечений при нагрузке



Шаг 285



Шаг 370

Рисунок 188 – Цветовые диаграммы изменения ϵ_{II} ; шаги при разгрузке (285–370)

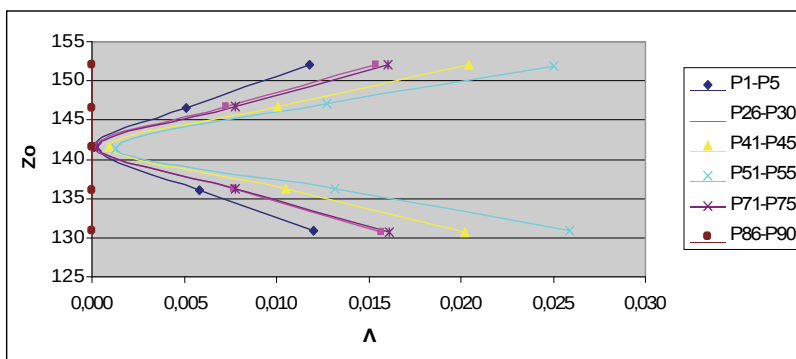
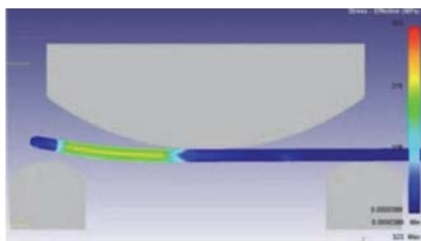


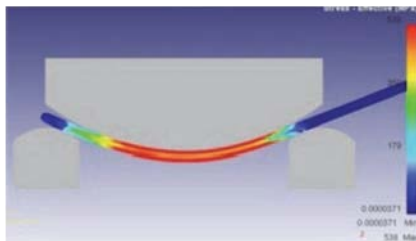
Рисунок 189 – Эпюра изменения ϵ_{II} для фиксированных сечений при разгрузке

Напряженное состояние ТЗ

Эпюры распределения интенсивности напряжений по толщине заготовки представлены на Рисунках 190–193.



Шаг 1



Шаг 283

Рисунок 190 – Цветовые диаграммы изменения σ_n ; шаги при нагрузке: 1–283

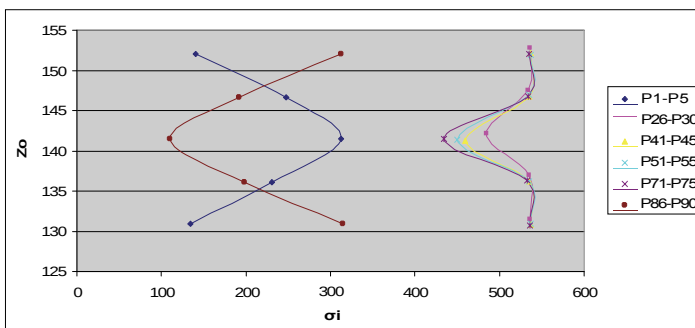
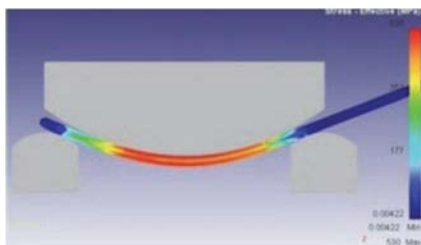
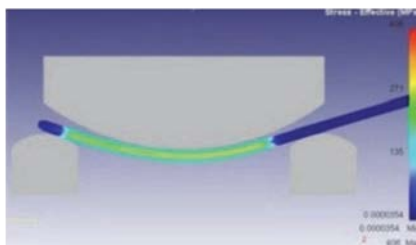


Рисунок 191 – Эпюры изменения σ_n для фиксированных сечений при нагрузке



Шаг 285



Шаг 370

Рисунок 192 – Цветовые диаграммы изменения σ_n для поэтапной формовки по шагам при разгрузке: 285–370

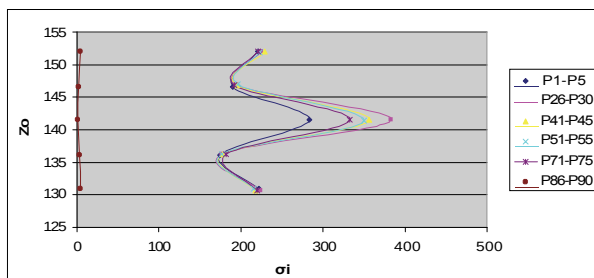
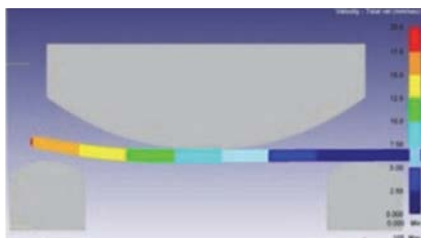


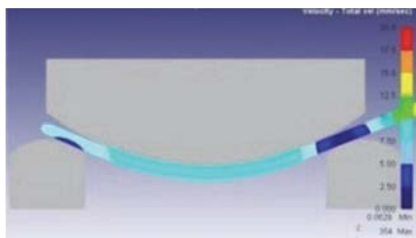
Рисунок 193 – Эпюра изменения σ_n для фиксированных сечений при разгрузке

Кинематика частиц ТЗ

Цветовые диаграммы компонент распределения абсолютной скорости частиц заготовки в сечениях по толщине (V) для поэтапной формовки по шагам представлены на Рисунках 194–195.



Шаг 1



Шаг 283

Рисунок 194 – Цветовые диаграммы распределения V для поэтапной формовки по шагам (при нагрузке): 1–283

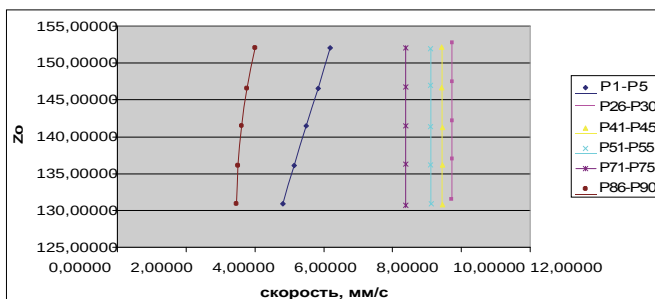


Рисунок 195 – Эпюра изменения значений модуля V частиц для фиксированных сечений при нагрузке

Цветовые диаграммы распределения компоненты скорости частиц заготовки по толщине (V_x) для поэтапной формовки представлены на Рисунках 196, 197.

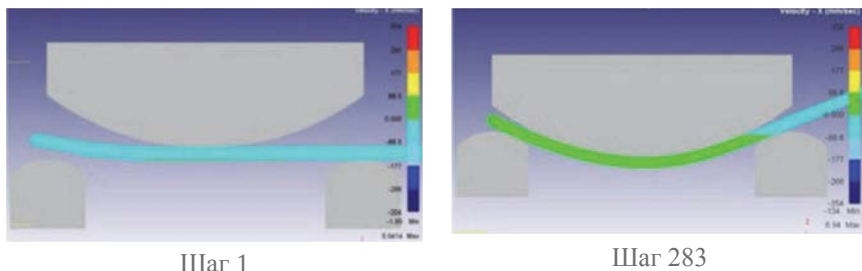


Рисунок 196 – Цветовые диаграммы распределения V_x для поэтапной формовки по шагам (при нагрузке): 1–283

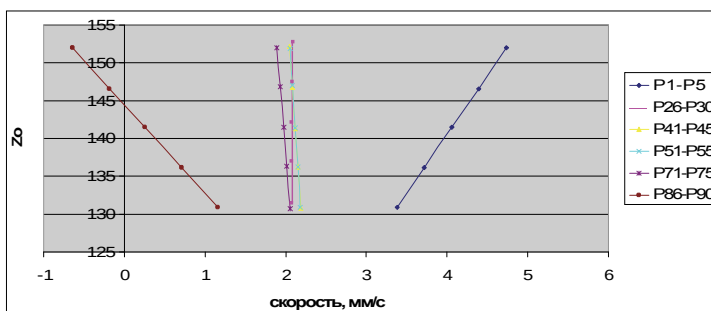


Рисунок 197 – Эпюра изменения V_x для фиксированных сечений при нагрузке

По представленной аналогии были рассчитаны последующие технологические шаги формовки трубной заготовки, обеспечивающие получение профиля с заданными геометрическими параметрами. Для всех последующих шагов были проведены расчеты НДС и скоростей перемещений материальных частиц заготовки.

Выводы: Анализ параметров НДС фиксированных волокон ТЗ (3–7) очага деформации 1 шага ПШФ в конце нагружения показал:

- 3 фиксированное волокно в конце нагружения контактирует с пуансоном пресса, а остальные волокна находятся в состоянии неконтактной деформации, при этом значения ϵ_x на поверхности ТЗ изменяются в диапазоне 0,049–0,039;

- значения интенсивности деформаций ϵ_n на поверхности ТЗ для фиксированных волокон изменяются в диапазоне 0,053–0,039;
- значения интенсивности напряжений на поверхности ТЗ
- изменяются в диапазоне 710–520 МПа; При разгрузке деформации уменьшаются незначительно, характер распределения по толщине ТЗ не меняется, а интенсивность напряжений снижается и остается в диапазоне 270–240 МПа.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Скрипаленко М.М.
«МИСиС», г. Москва, Россия

При исследовании процессов, связанных с металлургическим производством, широко применяются вычислительные среды конечно-элементного анализа. Перечень решаемых с их помощью задач довольно широк. Это могут быть исследования процессов литья [Fadeev, Bazhenov, Koltygin, 2015], обработки давлением [Numerical simulation of hot hydrostatic extrusion of W-40 wt.% Cu, 2009], термообработки [Kharitonov, Stolyarov, 2013] и др. Представляет интерес исследование процессов, связанных с выплавкой чугуна с применением конечно-элементного моделирования.

Воздушные фурмы являются одним из важнейших элементов конструкции доменной печи, определяющих эффективность ее работы; выход фурм из строя влечет за собой необходимость остановки печи для замены разрушенной фурмы. Простои печи по этой причине приводят к существенному снижению выплавки чугуна и увеличению расхода кокса. Кроме того, на воздушные фурмы приходится 30% всех тепловых потерь в печи. Поэтому проблема повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность является актуальной.

В настоящее время данная проблема решается различными путями: нанесением газотермических покрытий на рабочую поверхность фурмы [Пат. № 2215043 РФ, 2002, Пат. 2387716 РФ, 2010, Пат. 2465333 РФ, 2012],

футеровкой огнеупорами со стороны дутьевого канала [А. с. № 159870 СССР, 1964] и др. Для дальнейшего повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность целесообразно моделирование их теплового состояния.

Целью работы явилось, используя вычислительную среду конечно-элементного анализа, исследовать динамику нагрева воздушной фурмы, влияние теплоизолирующей вставки и газотермического покрытия на температурное поле фурмы, а также тепловое состояние фурмы при ее взаимодействии с жидким чугуном.

Методика исследований

Известна методика расчета тепловых потерь через воздушную фурму [Пат. № 2235789 РФ, 2004]. В работе использовали формулы стационарной теплопроводности для плоской и цилиндрической стенки [С.С. Кутателадзе, В.М. Борищанский, 1959]. Методика позволяет рассчитать тепловой поток через поверхность фурмы и распределение температуры ее составляющих в установившемся состоянии.

Задача расчёта динамики нагрева воздушной фурмы может быть сведена к решению соответствующей осесимметричной задачи. Для её решения использовали программу DEFORM-2D.

Исходными данными для создания модели являлась воздушная фурма конструкции ПАО «Северсталь» для ДП–5. Толщина внутреннего стакана $h_{вн} = 6$ мм, наружного стакана $h_n = 15$ мм, торца рыльной части $h_{рт} = 30$ мм, средняя толщина боковой поверхности рыльной части и со стороны дутьевого канала $h_p = 18$ мм (Рисунок 198).

Геометрия фурмы была выполнена в среде Solid Works и сохранена в формате .dxf. После этого файлы с указанным расширением загружали в Pre-Processor DEFORM-2D и позиционировали их. На фурме формировали сетку из 5000 элементов. При моделировании температурного поля деталей фурмы были заданы следующие условия: материал – медь; $\lambda = 416$ Вт/(м·К); $C = 390$ Дж/(кг·К); $\varepsilon = 0,7$; $t_{дутья} = 1200^\circ\text{C}$; $\alpha_{дутье - медь} = 375$ Вт/(м²·К) [Расчет коэффициентов теплоотдачи поверхностям воздушной фурмы доменной печи от горна и горячего дутья, 2012]; начальная температура – 30°C . Граничные условия: окружающая среда – поверхность со стороны дутьевого канала, включая ступеньку; дополнительно: 1 – водоохлаждае-

мая полость – $t_{\text{воды}}=30^0\text{C}$; $\alpha_{\text{медь – вода}} = 5815 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$; $\epsilon=0$; 2 – торец и боковая поверхность рыльной части – $t = 1600^0\text{C}$; $\alpha_{\text{среда – рыло}} = 268 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$; $\epsilon=0,7$; 3 – наружный стакан – $t = 1600^0\text{C}$; $\alpha_{\text{среда – нар. стакан}} = 118 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$; $\epsilon=0,7$. Шаг по времени принимали равным 2 с.

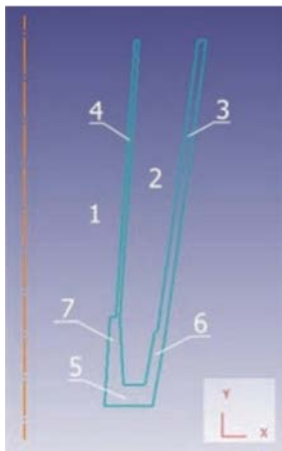


Рисунок 198 – Геометрия воздушной фурмы для моделирования в Deform 2D: 1 – дутьевой канал, 2 – водоохлаждаемая полость, 3 – наружный стакан, 4 – внутренний стакан, 5 – торец рыльной части, 6 – боковая поверхность рыльной части, 7 – рыльная часть со стороны дутьевого канала

Результаты и их обсуждение

Во время расчета в DEFORM-2D, наблюдали за изменением температуры различных частей фурмы. По результатам расчёта в Post-Processor DEFORM-2D для анализа результатов использовали функцию Point Tracking. Выделили пять узлов сетки конечных элементов (Рисунок 199), узлы отмечены чёрными точками и пронумерованы P1, P2, P3, P4 и P5, номера узлов на рисунке показаны белым цветом. Для каждого из узлов построили с помощью DEFORM-2D графики изменения температуры точки (узла) по времени. Установили, что времени 1,5–2,0 мин достаточно для выхода температуры различных частей фурмы на стационарный режим. Больше всего времени для выхода температуры на стационарный режим требуется торцу рыльной части из-за его большей толщины, имеющего максималь-

ные значения температуры нагрева (371°C) и перепад температуры по толщине (около 80°C).

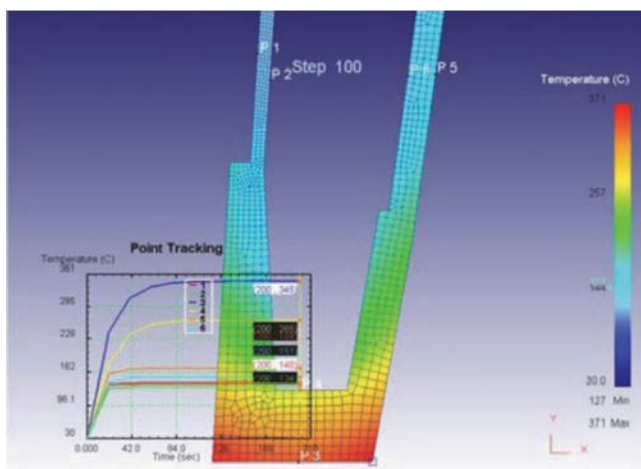


Рисунок 199 – Температурное поле деталей медной фурмы

При моделировании температурного поля деталей фурмы с теплоизолирующей вставкой толщиной $h_{\text{вс}} = 8$ мм, установленной во внутренний стакан со стороны дутьевого канала (Рисунок 200), условия были дополнены следующими данными: материал – теплоизоляция; $\lambda = 3$ Вт/(м·К); $C = 780$ Дж/(кг·К); $\epsilon = 0,46$.

На фурме и вставке формировали сетку – по 5000 элементов. Шаг по времени принимали равным 6 с. Выбрали четыре узла P1-P4 (Рисунок 200) и построили для них график изменения температуры аналогично показанному на Рисунке 199.

На Рисунке 200 показано место контакта трех объектов: вставки, внутреннего стакана и рыльной части со стороны дутьевого канала. Анализируя изменение поля температур и температур в выбранных узлах, установили, что время выхода температуры вставки на стационарный режим увеличивается до 3 мин по сравнению с фурмой без вставки. Наблюдается градиент температуры вставки по ее толщине до $540\text{--}555^{\circ}\text{C}$, причем максимального значения температура вставки достигает на поверхности со стороны дутьевого канала. В то же время температура внутреннего стакана снижается на $35\text{--}40^{\circ}\text{C}$ по сравнению с фурмой без вставки.

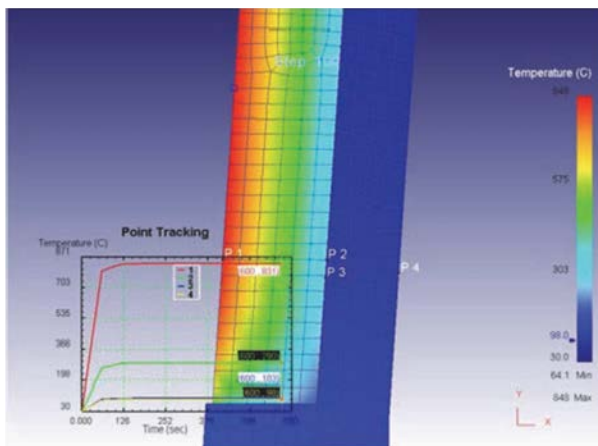


Рисунок 200 – Температурное поле внутреннего стакана фурмы и теплоизолирующей вставки, плотно прилегающей к внутреннему стакану и рыльной части со стороны дутьевого канала

При моделировании температурного поля деталей фурмы с теплоизолирующей вставкой толщиной $h_{вс} = 8$ мм, установленной во внутренний стакан со стороны дутьевого канала с воздушным зазором $h_{воз} = 1$ мм (Рисунок 201), условия процесса были дополнены следующими данными: свойства: материал – воздух; $\lambda=0,0362$ Вт/(м·К); $C=1005$ Дж/ (кг·К); $\varepsilon=0,01$.

На Рисунке 201 показано место контакта вставки, воздуха, внутреннего стакана и рыльной части со стороны дутьевого канала. Для анализа результатов выбрали 6 узлов, P1-P6, в интересующих зонах (Рисунок 200). Для каждого узла построили кривые изменения температур от времени. Видно, что в данном случае время выхода температуры вставки на стационарный режим увеличивается до 4 мин. Градиент температуры вставки по ее толщине снижается до $160\text{--}250^{\circ}\text{C}$ по сравнению с вариантом без воздушного зазора, причем максимальное значение температуры поверхности вставки со стороны дутьевого канала также увеличивается. Температура внутреннего стакана также снижается еще на $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$ по сравнению с вариантом без воздушного зазора. Однако наблюдается резкий градиент температуры воздушного зазора по его толщине до 760°C из-за низкой теплопроводности воздуха, чем и объясняется изменение температурного поля внутреннего стакана и вставки.

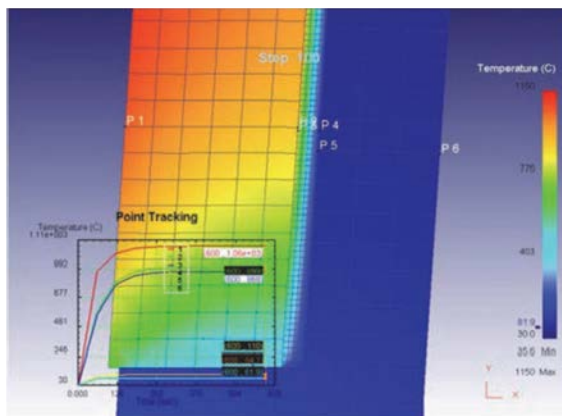


Рисунок 201 – Температурное поле внутреннего стакана фурмы, теплоизолирующей вставки и воздушного зазора между ними

Как было сказано выше, для повышения стойкости фурмы и снижения тепловых потерь на нее наносят газотермическое покрытие. В этом случае условия процесса были дополнены следующими данными: материал – алюминий с оксидом алюминия; толщина покрытия $h_p = 1$ мм; $\lambda=30$ Вт/(м·К), $c=656,5$ Дж/(кг·К), $\varepsilon=0,46$.

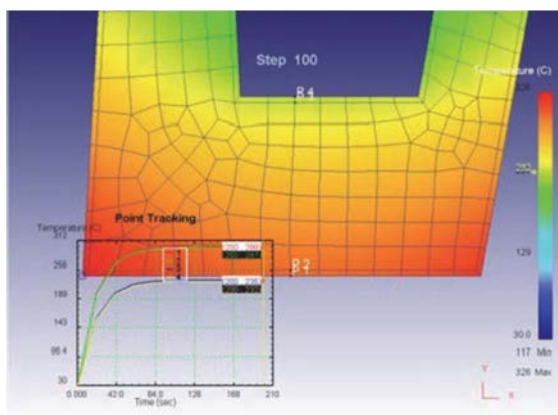


Рисунок 202 – Температурное поле торца рыльной части фурмы с покрытием

На фурме и покрытии формировали сетку – по 5000 элементов. Шаг по времени принимали равным 2 с.

Результаты моделирования температурного поля торца рыльной части фурмы представлены на Рисунке 202. Для иллюстрации перепада температур, помимо отображения поля температур, выбрали четыре узла, P1-P4 (Рисунок 202). Анализ результатов моделирования показал, что время выхода температуры, например, торца рыльной части, на стационарный режим не изменилось по сравнению с фурмой без покрытия. Однако максимальная температура нагрева торца рыльной части снизилась до 326°C , а максимальный градиент температуры по его толщине также снизился до 67°C .

Представляет интерес моделирование прогара фурмы при ее взаимодействии с жидким чугуном (Рисунок 203). Поле температур отображали с указанием графика изменения температуры для трёх узлов: P1, P2 и P3. Зона контакта с чугуном не превышала 20 мм по диаметру и длине торца рыльной части. Шаг по времени принимали равным 2 с.

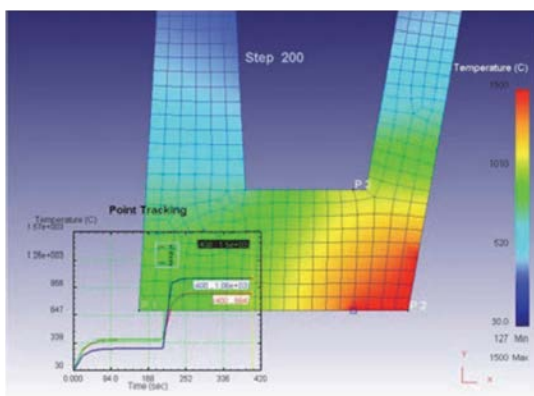


Рисунок 203 – Температурное поле рыльной части фурмы при прогаре

После 200 с нагрева фурмы (работа в стационарном режиме) происходит локальный контакт рыльной части с чугуном. Моделирование прогара выполняли следующим образом: граничные условия дополнены температурой на поверхности рыльной части в области контакта с чугуном – 1500°C ; $\alpha_{\text{чугун} - \text{рыло}} = 2100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [Емельянов, 1988]; $\alpha_{\text{медь} - \text{вода}} = 582 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Коэффициент $\alpha_{\text{медь} - \text{вода}}$ рассчитывали по формулам стационарной теплопроводности [Кутателадзе, Борищанский, 1959] при условии, что торец

рыльной части, как самый толстый, расплавился. При этом допускали, что на рыльную часть и наружный стакан нанесено алюминиевое газотермическое покрытие.

Через 40 с контакта с чугуном температура на поверхности рыльной части со стороны воды достигает 1050°C , а через 100 с – 1060°C , что практически равносильно прогару.

Заключение

Для расчета динамики нагрева воздушной фурмы методом конечных элементов (осесимметричная задача) использовали программу DEFORM-2D.

Показано значительное влияние теплоизолирующей вставки в дутьевой канал и воздушного зазора, отделяющего ее от внутреннего стакана, на температурное поле фурмы. Рассмотрено моделирование прогара фурмы при ее взаимодействии с жидким чугуном.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.В. Коровину и А.А. Сидорову за консультирование и помощь при разработке конечно-элементных моделей в DEFORM-2D.

Список литературы

1. Fadeev A.V., Bazhenov V.E., Koltygin, A.V. Improvement in the casting technology of blades for aviation gas-turbine engines made of TNM-B1 titanium aluminide alloy produced by induction crucible melting. Russian journal of non-ferrous metals. Vol 56, Issue 1, Jan 2015, pp. 26–32.
2. D.R. Li, Z.Y. Liu, Y. Yu, E.D.Wang. Numerical simulation of hot hydrostatic extrusion of W-40 wt.% Cu Materials Science and Engineering A 499 (2009) 118–122.
3. Kharitonov, V.A., Stolyarov A.Y. Development of a Competitive Technology to Make Wire for Metal Cord. METALLURGIST Vol 57, Issue 3–4, Jul 2013, pp. 320–325.
4. Пат. № 2215043 РФ. МКИ C21B7/16. Способ подготовки к работе фурмы доменной печи / Григорьев В. Н., Урбанович Г. И., Урбанович Е. Г. и др. – 20011337559/02; заявл. 11.12.01; опубл. 27.10.02 – Бюл.№30.
5. Пат. 2387716 РФ, C21B7/16. Способ подготовки фурмы доменной печи / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, С.С. Ляпин и др. (РФ). – №2008111753/02; заявлено 27.03.08; опубл. 27.04.10 – Бюл.№12.
6. Пат. 2465333 РФ, C21B7/16. Способ подготовки к работе воздушной фурмы доменной печи / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, Д.С. Васильев и др. (РФ). – №2011104102/02; заявлено 04.02.11; опубл. 27.10.12 – Бюл.№30.

7. А. с. № 159870 СССР. МПК C21b. Дутьевая фурма доменной печи с огнеупорной вставкой./Багрецов Е.Д., Ружальский Ю.И. – 805782; заявлено 03.12.1962; опубл.1401.1964. – Бюл.№2.

8. Пат. № 2235789 РФ. МКИ C21B7/16. Дутьевая фурма доменной печи и способ нанесения защитного покрытия на дутьевую фурму доменной печи / Маншилин А. Г., Складановский Е. Н., Нецветов В. И. и др. – 2002129285/02; заявл.04.11.02; опубл.27.05.04 – Бюл.№15.

9. Справочник по теплопередаче / *С.С. Кутателадзе, В.М. Борицанский*. – Л.–М.: Госэнергоиздат, 1959. –414 с.

10. Расчет коэффициентов теплоотдачи поверхностям воздушной фурмы доменной печи от горна и горячего дутья / *Н.Л. Кириллова, А.Г. Радюк, С.М. Горбатюк и др.* // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: материалы XIII международной научно-практической конференции 21–22 декабря 2012 г. в 2 т.: т. I / Науч.-инф. издат. центр «Институт стратегических исследований». – М.: Изд-во «Спецкнига», 2012. – С. 132–135.

11. *Емельянов В.А.* Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. – М.: Металлургия, 1988. – 143 С.

Научное издание

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ФОРУМА
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ – 2016

Москва, 4–5 апреля 2016 г.

Подписано в печать 25.07.2016 г.
Формат 60х90 1/16. Усл.печ.л. 12,5. Тираж 80 экз. Изд. № 210.

Издательство ООО «МАКС Пресс»
Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.

119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы,
МГУ им. М.В. Ломоносова, 2-й учебный корпус, 527 к.
Тел. 8(495)939-3890/91. Тел./Факс 8(495)939-3891.

Напечатано с готового оригинал-макета
в ООО «МакЦентр.Издательство»
115191, Москва, Холодильный пер., д. 3, корп. 1, стр. 3
Тел. 8495 234 0444.
Заказ