

Инжиниринговая компания «ТЕСИС»

Международный форум

# **Инженерные системы - 2017**

11 – 12 апреля 2017 г.

Тезисы докладов

Москва  
2017

**Инженерные системы-2017.** Программа и тезисы докладов  
Международного форума. Москва. 11-12 апреля 2017г.

© Коллектив авторов, 2017

© ООО «ТЕСИС», 2017

## ТЕЗИСЫ

### Конференция пользователей FlowVision

#### **РАЗВИТИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ПЛАТФОРМЫ**

**Аксёнов А.А., Силаев Д.П.**

*ООО «ТЕСИС», г. Москва*

В настоящее время существует множество различных систем автоматизации инженерных расчетов (САЕ) для решения задач гидродинамики, прочности, электродинамики и т.п. Это различные, несвязанные между собой коды, что порождает сложности в проведении совместных расчетов, трудности обучения пользователей из-за различного пользовательского интерфейса, несовместимость принципов лицензирования, несовместимость средств визуализации. Вычислительная инженерная платформа (ВИП) – это платформа для коллективной разработки и лицензирования универсальной САЕ-системы, которая позволит преодолеть изложенные выше проблемы. Данная платформа предоставляет единый пользовательский интерфейс, позволяет проводить совместные междисциплинарные расчеты, обеспечивает коллективное обучение пользователей не только вендором САЕ-системы, но и широкими группами разработчиков модулей, предоставляет единую гибкую систему лицензирования.

В докладе представлены текущие наработки по реализации Вычислительной инженерной платформы на базе программного комплекса FlowVision путём создания в нём открытого интерфейса программирования приложения (API), через который осуществляется подключение внешних программных модулей к внутренним сервисам платформы. Подробно рассмотрена структура модуля и схема его работы совместно с платформой. Приведены примеры использования модулей. Затрагиваются вопросы лицензионной защиты.

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ МАСШТАБИРУЕМОСТИ FLOWVISION НА КЛАСТЕРЕ С ИНТЕРКОННЕКТОМ АНГАРАИ**

**Акимов В.С., Силаев Д.П., Харченко С.А.**

*ООО «ТЕСИС», г. Москва*

**Семенов А.С., Симонов А.С.**

*НИЦЭВТ, г. Москва*

В данной работе исследуется масштабируемость вычислений задач газодинамики в программном комплексе FlowVision на кластере «Ангара-К1» с интерконнектом Ангара. Рассматривались несколько тестовых задач, имеющих 260 тысяч, 5,5 млн. и 26,8 млн. расчетных ячеек. Показано, что технология «Динамическая балансировка» позволяет существенно увеличить производительность вычислений в задачах со сложной расчетной сеткой, способ-

ствующей неравномерной загрузке процессоров. Произведена оценка эффективности использования логических ядер Hyper-Threading при различном кол-ве используемых расчетных узлов. Показаны особенности и преимущества нового решателя AST, основанного на алгебраическом многосеточном методе (AMG). Кластер «Ангара-К1» продемонстрировал отличные характеристики производительности и масштабируемости вычислений, не уступающие аналогам с интерконнектом 4x FDR Infiniband.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ FLOWVISION ДВИЖЕНИЯ ГАЗА И ТЕПЛООБМЕНА В КОМПАКТНОМ КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ**

**Бевза Д.И., Шураев О.П.**

*ФГБОУ ВО «ВГУВТ», г. Нижний Новгород*

Во ВГУВТ накоплен большой опыт проектирования теплообменных аппаратов (ТА) различного назначения с трубчатыми поверхностями теплообмена. Это охладители наддувочного воздуха и масла, водо-водяные аппараты и котлы-утилизаторы (КУ). Разработана и непрерывно совершенствуется математическая модель проектно-проверочного расчета ТА.

Традиционная конструкция КУ предполагает его размещение в машинной шахте судна, что при достаточно высокой надстройке не вызывает проблем. Однако, с появлением проектов судов с ограниченной высотой надстройки потребовался пересмотр компоновки КУ. Разработана конструкция компактного КУ, отличающаяся горизонтальным размещением теплообменной секции (ТС) и поворотной заслонки непосредственно внутри корпуса. По этой причине движение теплоносителя в теплообменной области таково, что, будучи параллельным осям труб на входе в ТС, поток газа затем совершает поворот на 90°, омывая теплообменные трубы, и еще раз поворачивает на 90° к выходу из ТС. Сложный характер омывания трубного пучка ставит под сомнение возможность использования известных уравнений подобия.

Выходом стало моделирование движения газа и теплоотдачи в пакете вычислительной гидродинамики FlowVision. Конечно, для полноценного моделирования теплообмена необходимо адекватное описание течения в пограничном слое, что, в свою очередь, требует большого количества ячеек у поверхности каждой трубы. Полностью использовав располагаемые ресурсы версии 2.5, нам удалось получить поля скорости, давления и температуры, дающие вполне достоверное (хотя бы качественное!) представление о движении газа и теплообмене. Особенностью расчета стало задание постоянной температуры на поверхности теплообменных труб (60 °С), соответствующей одному из режимов работы КУ, что позволило ограничиться рассмотрением теплоотдачи на наружной поверхности труб.

Выполнено несколько расчетов, отличающихся начальной скоростью газа и конструкцией некоторых элементов. Помимо качественного и количественного факторного влияния на теплогидравлические характеристики ком-

пактного КУ, выявлены некоторые закономерности поведения потока в ТС и теплообмена, вполне согласующиеся с теорией теплопередачи.

## **НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ В КОМПАКТНОМ КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ**

**Бевза Д.И., Шураев О.П.**

*ФГБОУ ВО «ВГУВТ», г. Нижний Новгород*

В среде FlowVision выполнена серия расчетов движения газа и теплообмена в каналах компактного котла-утилизатора (КУ) с комбинированным размещением в едином корпусе теплообменной секции (ТС) и байпасного хода. Рассматривалось вытеснение холодного (60 °С) газа горячим (600 °С).

Поле скоростей устанавливается практически с первых итераций. Поток газа, попадая во внутренний объем КУ через диффузорный патрубок, благодаря подпорному эффекту экрана за диффузором, с уменьшением отрывных зон равномерно перестраивается к выходному сечению патрубка и разворачивается в перпендикулярном направлении. Особенности размещения ТС приводят к образованию застойных зон на пути движения газа из-за отсутствия плавного обтекания заднего ее корпуса. Но сужение канала в области подвода газа к трубному пучку придает потоку ускорение, тем самым выравнивая входное поле скорости. При прохождении ТС наблюдается дальнейшее выравнивание скорости. За трубным пучком поток вновь разгоняется. Однако основная область его движения лежит у верхней стенки корпуса КУ вплоть до выходного патрубка, где большая часть, ускорившись, покидает аппарат, а оставшиеся слои образуют зону возвратного течения.

Формирование поля давления происходит значительно позже скоростного, и при нулевом противодавлении позволяет оценить газодинамическое сопротивление всего КУ и локализовать основные области изменения давления. Основное газодинамическое сопротивление сосредоточено в ТС, перепад давления в которой составляет 150...325 Па в зависимости от значения входной скорости.

Поле температур, устанавливающееся в последнюю очередь и лимитирующее минимальную продолжительность расчета, вплоть до трубного пучка остается изотермичным из-за адиабатности граничных условий. В ТС присутствует некоторая неоднородность, вызванная преимущественно обводным «паразитным» течением, не участвующим в теплообмене и формирующим горячие слои за трубной секцией, чреватые термическими напряжениями в материале корпуса КУ. Прочие пульсации температуры в объеме трубного пучка обязаны скоростным и компоновочным факторам, однако не превышают 10 °С в выходном сечении аппарата.

В процессе моделирования и анализа результатов накоплен опыт оценки влияния различных конструкционных и эксплуатационных (режимных) факторов на основные теплогидравлические параметры КУ, открывающий воз-

возможности оптимизации конструкции. В дальнейшем, планируется подготовка и проведение серии экспериментов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КЛАПАНЕ - ПУЛЬСАТОРЕ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ПРИВОДА

Искович-Лотоцкий Р.Д., Иванчук Я.В., Веселовский Я.П.

Винницкий национальный технический университет, г. Винница

Гидроимпульсным называют насосный гидравлический привод, который обеспечивает периодическое генерирование импульсов давления рабочего вещества в полости приводного гидроцилиндра рабочего звена машины с помощью специального оригинального двухпозиционного гидрораспределителя, который называется клапан-пульсатор (рис. 1).

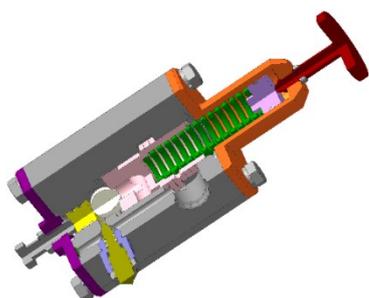
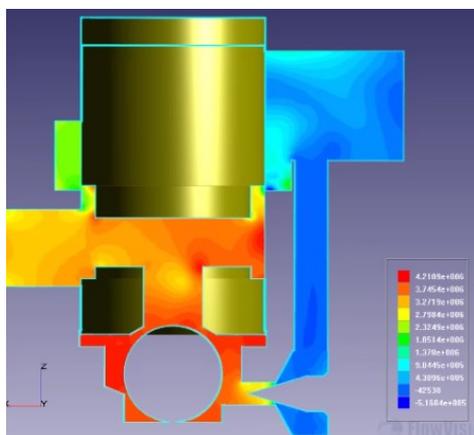


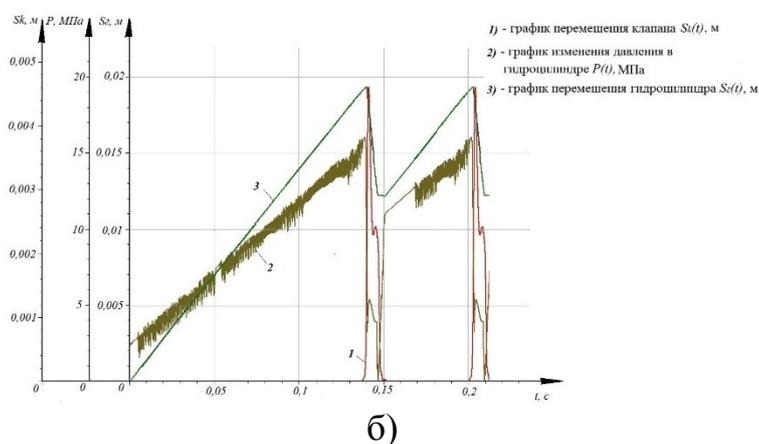
Рис. 1. Конструктивная схема оригинального клапана-пульсатора

В работе приведены результаты теоретического исследования методом численного моделирования в программе FlowVision гидродинамических процессов, в качестве основных рабочих процессов, в клапане-пульсаторе гидроимпульсного привода (рис. 2). На рисунке 3, а показано распределение давления в полости клапана пульсатора в зависимости от времени работы клапана, а также на рисунке 2, б показаны основные рабочие характеристики работы гидроимпульсного привода.

гидроимпульсного привода.



а)



б)

Рис. 2. Результаты численного моделирования гидродинамических процессов в клапане-пульсаторе гидроимпульсного привода:

а) распределение давления в клапане-пульсаторе; б) основные рабочие характеристики гидроимпульсного привода

Полученные результаты численного моделирования в программе FlowVision с достаточной точностью соответствуют экспериментальным данным работы реального устройства гидроимпульсного привода.

## **К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ k-ε FLOWVISION ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ПРОФИЛЯ КРЫЛА ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА**

**Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Калашников С.В., Митин А.Л.**

*ООО «ТЕСИС», г. Москва*

В связи с бурным развитием беспилотной авиации и ветроэнергетики становится крайне актуальным и востребованным расширение возможностей исследования течений жидкости и газа при малых числах Рейнольдса за счет численных методов. В силу значительного влияния положения точки ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя на результирующие интегральные и распределенные параметры течения точное моделирование ламинарно-турбулентного перехода является основной проблемой применения численных методов для исследования данного класса течений.

В данном докладе представлены промежуточные результаты применения вычислительного кода FlowVision и специализированной двухпараметрической модели турбулентности k-ε FlowVision для исследования интегральных и распределенных аэродинамических характеристик профиля Eprler 387 при значении числа Рейнольдса  $Re = 200000$ . Рассмотрены методические вопросы настройки параметров модели для задач исследования ламинарно-турбулентного перехода с образованием ламинарного пузыря, приведено сравнение с результатами экспериментальных исследований.

Расчеты частично выполнялись на кластере Курчатовского института.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOW VISION ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ**

**Булысова Л.А., Пугач К.С.**

*ОАО «ВТИ», г. Москва*

Доклад посвящен исследованию процессов течения и горения в существующей конструкции камеры сгорания (КС) ГТУ, для которой требуется увеличение ресурса работы. Приводятся результаты расчетных и экспериментальных исследований базового варианта данной КС на программном комплексе FlowVision и экспериментальной установке испытательного стенда ОАО "ВТИ". Представлены качественные и количественные сравнения результатов.

В результате анализа расчетных данных выявлены недостатки в организации пленочного охлаждения внутренней стенки пилотной горелки. Обнаружена высокая неравномерность распределения воздуха по горелкам. На основе полученных данных разработаны мероприятия по оптимизации системы охлаждения. Проведены многовариантные расчетные исследования и испытаны на стенде лучшие из них.

Показана эффективность применения расчетно-экспериментального подхода к оптимизации конструкций существующих камер сгорания ГТУ с целью увеличения их ресурса.

### **ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION В ПАО ТМКБ «СОЮЗ»**

**Бывальцев П.М., Гришанькин Е.А., Видинеев Д.С., Железов А.Г.**

*ПАО ТМКБ «СОЮЗ», г. Лыткарино*

В докладе представлена часть результатов полуторагодичной опытной эксплуатации программного комплекса FlowVision в ПАО ТМКБ «Союз», входящем в АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение». Программный комплекс использовался для моделирования газодинамических процессов, протекающих в различных элементах разрабатываемых изделий. Приведены примеры эффективного применения программного комплекса FlowVision для решения задач, имеющих практическое значение. Указываются особенности и преимущества программного комплекса при его использовании для поиска и оперативного принятия конструкторских решений в ходе выполнения проектно-конструкторских работ.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОВЫХОДА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ИЗ ПУСКОВОЙ ТРУБЫ**

**Пыреев А.О., Тарасов Ю.А.**

*ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт-Петербург*

Работа посвящена изучению процесса движения исследовательского подводного аппарата (ИПА) внутри пусковой трубы. Процесс представляет из себя разгон ИПА внутри трубы заполненной водой, один из торцов которой закрыт, а другой открыт и имеет выход во внешнюю среду. Движение ИПА осуществляется за счёт вращения собственного гребного винта. При моделировании данного процесса в среде программы FlowVision решается связанная задача движения ИПА за счёт вращения гребного винта в поле гидродинамических сил, действующих на аппарат.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В МИКРОЭЛЕКТРОННОМ УСТРОЙСТВЕ**

**Маркова Т.В.**

*ООО «ТЕСИС», г. Москва*

Современные темпы развития электронных устройств подразумевают под собой проектирование печатных плат нового поколения. Остро стоит проблема перед разработчиками печатных плат по оптимизации данного

процесса. Разработка радиоэлектронного устройства обычно включает в себя такие подзадачи, как создание и ведение базы электрорадиоизделий, создание принципиальной электрической схемы, проектирование печатной платы, в том числе размещение элементов на плате и разводка соединений, подготовка и выпуск конструкторской и производственной документации. Неотъемлемой частью данного процесса является тепловой расчет по предотвращению избыточного перегрева печатных плат, позволяющий на этапе разработки внести корректировки в конструкцию, как самой печатной платы, так и других элементов радиоэлектронного устройства, обеспечивая тем самым соответствие требованиям к тепловым характеристикам платы.

Работа посвящена возможности интеграции ПК FlowVision в автоматизированный процесс разработки радиоэлектронного устройства для проведения тепловых расчетов. Во FlowVision моделируется трехмерный нагрев элементов платы и отвод тепла в окружающую среду. Трехмерное распределение температуры позволяет получить информацию о тепловых свойствах платы, сравнить значения температур в процессе моделирования с максимально заданными величинами, согласно имеющимся требованиям, что позволяет оценить работу всего радиоэлектронного устройства и, при необходимости, внести корректировки в конструкцию и продолжить/возобновить тепловой расчет уже с принятыми изменениями.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОДХОДОВ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ FSI ЗАДАЧ**

**Москалёв И.В., Акимов В.С., Каширин В.С.**

*ООО «Вычислительная инженерная платформа», г. Москва*

Инженерное проектирование – это поиск научно обоснованных и технически осуществимых решений различных задач. Не смотря на непрекращающийся рост вычислительных мощностей, все еще не представляется возможным решать широкий спектр задач напрямую. В этом докладе рассматриваются методики решения двух задач, которые не могут быть решены за разумное время без применения инженерных методов. Первая задача – работа резинового уплотнения двери автомобиля во время мойки автомобиля струей воды, выпускаемой из мойки высокого давления. Прямое трехмерное моделирование распада струи и взаимодействие множества капель с конструкцией не представляется целесообразным. Во второй задаче рассматривается работа уплотнения штока в системе высокого давления. Необходимо рассчитать утечки масла через уплотнение в условиях сверх малых зазоров. В поставленной задаче непосредственное влияние на объем утечек оказывает качество обработки поверхностей, образующих зазор. Прямое моделирование шероховатости не представляется целесообразным. Однако применение научно обоснованного инженерного подхода позволило решить обе задачи за считанные часы.

# **ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ СТЕНДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТ ДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FLOWVISION**

**Горшенев Е.А.**

*АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград, Россия*

Развитие ЭВМ и методов математического моделирования способствовало появлению физико-математической дисциплины вычислительная гидродинамика (ВГД). Появившиеся благодаря этому вычислительные программные комплексы (ПК) открыли перед исследователями небывалые ранее возможности в изучении гидрогазодинамических процессов.

На практике имеется актуальная задача исследования газодинамического воздействия на элементы стендового оборудования от действия высокоскоростного газового потока. Зачастую при проведении испытаний имели место случаи разрушения элементов конструкций, тогда как расчёты, основанные на полуэмпирических методиках, таких результатов не прогнозировали. В настоящее время появилась возможность проведения вычислительных экспериментов гидрогазодинамических процессов при помощи ПК ВГД. Большое количество опытных данных позволяет верифицировать и отладить расчётную модель.

В докладе приводятся результаты исследований по определению силового воздействия на элементы конструкции стендового оборудования от действия высокоскоростного газового потока. Представлена верификация модели.

## **ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА**

**Клименко Д.В., Тимушев С. Ф., Мадиредди Т.**

*Московский авиационный институт (НИУ), г. Москва*

Численное моделирование трехмерного течения в проточной части центробежного компрессора дает возможность с минимальными затратами отработать оптимальную геометрию проточной части, а также уделить внимание не только повышению КПД, но и снижению пульсаций давления. В процессе работы исходная геометрия центробежного колеса существенно изменена. Эти изменения – углы установки лопаток, введение укороченных лопаток, изменение профиля лопаток, формы входной и выходной кромок, проверялись вычислительным экспериментом. В итоге получена геометрия рабочего колеса, дающая более высокий напор при расширении рабочего диапазона.

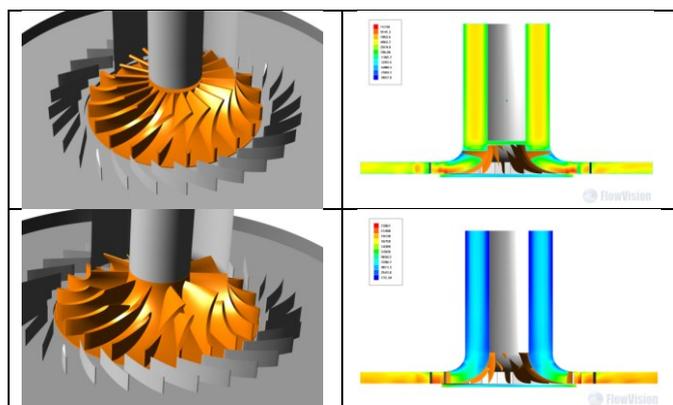


Рисунок 1. Малорасходный центробежный компрессор. Вверху – исходный вариант геометрии РК и распределение полного давления. Внизу- новый вариант геометрии РК и распределение полного давления

Расчеты выполнялись с использованием ПО FlowVision V3 с моделированием зазора между корпусом и лопатками РК и течения в НА.

### **Конференция пользователей SIMULIA Abaqus**

## **ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ РАЗРУШАЮЩИХ УСИЛИЙ ПОЛУПОГРУЖНОГО ЛЕДОКОЛЬНОГО ТАНКЕРА**

**Терехова А.Г., Щербаков В.Н.**

*МФТИ, г. Долгопрудный*

При транспортировке нефти и сжиженного газа при помощи танкеров в арктических условиях большую проблему представляет воздействие на них ледяных полей. Представленное в данной работе полупогружное транспортное ледокольное судно нового типа для перевозки жидких грузов способно самостоятельно преодолевать сплошные ледяные поля, что значительно сокращает время кругового рейса и является существенным преимуществом перед танкерами, нуждающимися в ледокольном обслуживании.

Разрушение льда осуществляется снизу-вверх прочным узким тараном, расположенным вдоль всего корпуса сверху. Рассмотрен случай, когда тангенс угла между разрушающей кромкой ледокола и плоскостью льда равен нулю (разрушение при всплытии танкера) и  $1/15$  (разрушение осуществляется при наезде тарана на плиту льда) с учетом коэффициента трения для пары морской лед и полированная нержавеющая сталь смоченная водой. Ледяной покров рассматривается как упругие однородные изотропные плиты, лежащие на винклеровском основании. Решалась задача цилиндрического изгиба полубесконечных и конечных ледяных плит различных размеров и толщин. Расчет разрушения льда тараном, разрушающая кромка которого находится под острым углом к плоскости плиты, осуществлялось с помощью вычислительного комплекса Abaqus. Величины разрушающих нагрузок и прогибы при цилиндрическом изгибе конечных и бесконечных плит для вертикального воздействия определялись аналитически из решений дифференциального уравнения четвертого порядка и с помощью вычислительного комплекса

Abaqus. Полученные данные показали хорошую сходимость двух приведенных подходов. Для конечных плит решение осуществлялось методом начальных параметров А.Н.Крылова, при различных граничных условиях. Получены величины нагрузок, приводящих к образованию трещин и полного пролома плит для различной толщины льда от 1 до 6 метров. За критерий разрушения принималось предельное растягивающее напряжение при изгибе для морского льда.

В работе были получены результаты, подтверждающие, что конструкция ледокола позволяет создавать вертикальное усилие достаточное для разрушения ледяных полей толщиной до 7 м и более, что на сегодняшний день превосходит показатели любого ледокольного судна, введенного в эксплуатацию и находящихся в стадии постройки и проектирования.

## **SIMULIA ABAQUS В ЗАДАЧАХ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Макаров С.Б., Панкова Н.В.**

*ИМАШ РАН, г. Москва*

**Тропкин С.Н.**

*ООО «ТЕСИС», г. Москва*

Ранее, на прошлых форумах TESIS мы докладывали материалы по разработке многочастотных динамических гасителей колебаний, которые способны гасить нежелательные колебания зданий и сооружений сразу на нескольких частотах, т.е. в заданном частотном диапазоне.

Для задачи сейсмозащиты зданий и сооружений было предложено использовать упругую емкость, заполненную жидкостью (водой). Такой гаситель обладает целым набором резонансных частот. Варьируя упругость емкости и объем жидкости, можно добиться эффекта гашения колебаний здания, на котором находится гаситель, в нужном диапазоне частот.

В развитие упомянутых выше работ начаты исследования по изучению резонансных свойств сооружений при различных схемах их опирания, в том числе с использованием виброопор с кинематическими степенями свободы, с целью научиться управлять этими свойствами для гашения сейсмических колебаний защищаемых объектов.

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

**Дубиня Н.В., Макарова А.А., Фокин И.В.**

*ИФЗ РАН, г. Москва*

При лабораторных исследованиях фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) образцы горной породы стандартного цилиндрического типоразмера подвергают трехосному сжатию в установке высокого давления. Обеспечива-

ется поток флюида за счет разницы поровых давлений, приложенных к торцам образца. Технологические ограничения не позволяют обеспечить приток флюида через всю площадь торца, что приводит к систематической ошибке при расчете проницаемости. Данный эффект становится тем существеннее, чем меньше проницаемость образца. При низких значениях проницаемости, близких к значениям, актуальным на текущем этапе разработки месторождений, эффект граничных условий становится достаточно значимым, чтобы разработать подход к его учету.

В работе представлены результаты численного моделирования процесса фильтрации с упором на область рядом с торцом. В данной области наиболее значимо влияние геометрии канала подвода жидкости на результаты эксперимента ввиду искривления линий тока и хрупкого разрушения образца. Эти эффекты являются основным предметом исследования в данной работе.

Было проведено численное моделирование процесса фильтрации через образец с различными схемами подведения жидкости к торцам. Моделирование проводилось в рамках пороупругой модели, методом конечных элементов. Выполнен анализ влияния на исследуемый образец следующих параметров: фильтрационно-емкостных и механических свойств породы, геометрических характеристик схем подвода жидкости. Была поставлена задача поиска оптимальной геометрии подвода жидкости для минимизации ошибки, наведенной граничными эффектами.

Естественным результатом решения задачи явилось максимальное устранение граничного эффекта путем увеличения площади подвода жидкости. С другой стороны, такой результат приводит к росту малой зоны хрупкого разрушения образца рядом с торцом. Была выявлена необходимость минимизации этого эффекта, играющего роль ограничения сверху, наложенного на площадь подвода жидкости. Таким образом, оптимизация геометрии была выполнена при совместном учете двух условий.

Представленные в работе результаты по поиску оптимальной геометрии были получены путем множественных расчетов на нескольких типичных геометриях подвода жидкости. Рассматривается вопрос о возможности и целесообразности применения к решению задачи подходов параметрической и непараметрической оптимизации.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ABAQUS В ОБЛАЧНОЙ БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ**

**Федоров И.М.**

*ИНФОСИС ЛИМИТЕД, г. Москва*

Исключительно актуальной тенденцией развития промышленности сегодня является цифровая трансформация [1], которую можно описать как внедрение веб-технологий и аналитического программного обеспечения в такие отрасли как тяжелое машиностроение, нефтегазовую и энергетическую промышленность. В частности, цифровые технологии находят применение в

управлении ресурсом деталей и узлов двигателей и энергетических установок путем создания цифровых двойников [2, 3].

При традиционном подходе к управлению ресурсом деталей и узлов результаты трехмерных конечноэлементных расчетов зачастую хранятся в виде технических отчетов, иллюстраций и таблиц. Сами же пространственные данные, к примеру, величины температур, напряжений и перемещений во всех узлах КЭ сетки, либо не хранятся, что связано с их большим объемом, либо доступны только непосредственно инженерам — прочнистам так как для просмотра требуют использования специального программного обеспечения (типа ABAQUS Viewer) и производительных рабочих станций. Таким образом, доступ к детальным прочностным результатам затруднен для смежных дисциплин, руководства проекта и полевых сервисных инженеров. Кроме того, обычно расчет ресурса выполняется для определенного набора условий эксплуатации и отсутствует возможность учесть влияние на ресурс реальной истории эксплуатации изделия.

Для преодоления перечисленных недостатков была разработана облачная база хранения результатов конечноэлементных расчетов с элементами цифрового двойника:

- Результаты расчета ABAQUS (\*.ODB) при помощи Python- скрипта использующего встроенные функции доступа к базе данных результатов ABAQUS преобразуются в специальный компактный бинарный формат, сохраняющий только результаты с поверхности объемной модели.
- Полученные компактные модели хранятся в облачной базе данных, и могут быть просмотрены через веб-браузер при помощи 3D графического интерфейса основанного на WebGL.
- С использованием правил суммирования повреждений Майнера и Робинсона, результаты анализа ресурса могут быть распространены на реальные условия эксплуатации.

## **ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ РАСЧЁТА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ОБТЕКАЕМЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛНЕНИЯ МОРЯ**

**Бадулин С.И., Левченко Д.Г.**

*ИО им. П.П. Шишова РАН, г. Москва*

**Вершинин В.В.**

*НИУ МГСУ, г. Москва*

Предлагается альтернативный регламентируемому СП 38.13330.2012 способ расчёта вертикальных обтекаемых сооружений на воздействие волнения моря. Волнение моря рассматривается как стационарный стохастический процесс, характеризующийся несколькими статистическими параметрами, зависящими от величины рассматриваемого временного интервала. По этим параметрам определяются спектральная плотность волнения моря и, приме-

няя известные соотношения, спектральная плотность горизонтальной компоненты гидродинамической нагрузки на вертикальное обтекаемое сооружение, которая является функцией не только частоты волнения моря, но и глубины. Используя ПК SIMULIA Abaqus, после определения собственных частот сооружения проводится расчёт его отклика на случайное воздействие, результатом которого являются спектральные плотности усилий и напряжений в конструктивных элементах сооружения, а также соответствующие им величины среднеквадратических отклонений. Расчётные усилия и напряжения в элементах сооружения определяются при их различной обеспеченности и с учётом длительности воздействия. Апробация предлагаемого способа расчёта проводится на проекте стационарного стабилизированного буя с использованием данных натурных наблюдений для определения статистических характеристик волнения моря.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСКРЫТИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО СПУСКАЕМОГО АППАРАТА**

**Медведский А.Л., Лысков Д.В.**

*Московский авиационный институт, г. Москва*

**Нуштаев Д.В.**

*ООО «ТЕСИС», г. Москва*

Доклад посвящен вопросам математического моделирования динамики раскрытия трансформируемой оболочечной конструкции, используемой в перспективных космических спускаемых аппаратах в качестве аэродинамических тормозных устройств [1, 2]. В качестве программного комплекса использовался ПП ABAQUS/Explicit, предназначенный для расчета задач нестационарной динамики, квазистатики, быстротекущих процессов.

Оболочечная конструкция в рабочем положении представляет собой подкрепленную жгутами торовую оболочку, изготовленную из кремнеземной ткани с нанесенным на нее резиноподобным теплозащитным покрытием. Деформационные свойства ткани описаны специализированной моделью материала (\*Fabric), учитывающей влияние ориентации армирующих волокон на деформирование ткани [3].

На первом этапе решена задача определения транспортной конфигурации оболочки, находящейся в отсеке космического аппарата. Для решения указанной задачи использовались подходы, основанные на использовании «естественной гравитации» с последующим деформационным обжатием оболочки.

На втором этапе рассмотрена задача о раскрытии подкрепленной оболочки вращения под действием внутреннего давления в нестационарной постановке. Проведено сравнение результатов математического моделирования

указанной задачи с использованием мембранных и оболочечных конечных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта № 15-08-04420\_a).

## **РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБИННЫХ ВОДОВОДОВ ГЭС, ПОМЕЩЕННЫХ В СУРОВЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ**

**Онищук В.С.**

*АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», г. Санкт-Петербург*

Высоконапорные железобетонные водоводы открытого типа (расположенные на низовой грани плотины) достаточно широко встречаются на гидроэлектростанциях, в том числе на станциях, работающих в условиях Сибири и Дальнего Востока. Водоводы последних ввиду сурового климата не запроектированы трещиностойкими.

Анализ их тензометрических данных показывает, что металлическая облицовка водовода в меньшей степени реагирует на его опустошение, нежели кольцевая арматура. Т.е. вызванные действием воды (статическим и температурным) кольцевые напряжения металлической оболочки оказываются меньше, чем напряжения кольцевой арматуры. Этот феномен можно объяснить, во-первых, тем, что во многих местах бетон водовода изрезан трещинами, и, во-вторых, дополнительной тепловой нагрузкой, возникающей при осушении водовода. Появление трещины где-либо в водоводе приводит к перераспределению напряжений в нем, и тензодатчик реагирует на это тем сильнее, чем ближе к трещине он располагается. При опустошении водовода помимо того, что снимается гидростатическое давление, изменяются еще и температурные условия, так как пространство, которое прежде заполняла вода, уже занимает воздух, имеющий другую температуру.

В теле водовода наряду с магистральными трещинами могут находиться и обширные зоны отслоения бетона от металлической облицовки. Несплошности подобного рода встречаются почти на всех открытых плотинных водоводах.

Таким образом, в модели водовода надо учитывать трещины, зазоры и среду (воду или воздух), заполняющую водовод.

В данной работе предпринята попытка на примере водоводов СШГЭС исследовать напряженно-деформированное состояние (НДС) водоводов, имеющих указанные дефекты (трещины и зазоры), и, по возможности, выявить параметры данных дефектов (глубину трещины и величину зазора). С этой целью при помощи программного комплекса SIMULIA Abaqus была построена численная модель двухметрового участка водовода и выполнены расчеты его НДС при различной возможной глубине верхней радиальной трещины.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРАВКИ ПЛОСКОГО ПРОКАТА**

**Трусов К.А., Копаев О.В.**

*АО «Северсталь Менеджмент», г. Череповец*

**Нуштаев Д.В.**

*ООО «ТЕСИС», г. Москва*

Лазерная резка является эффективным методом вырезки заготовок из листового металла благодаря высокой точности и производительности. Однако, остаточные напряжения в металле являются основным препятствием популярности данного метода.

В процессе производства стальная полоса подвергается высокотемпературному нагреву с последующим охлаждением и смоткой в рулон. В результате всех этих операций в металле накапливаются напряжения, действующие по всем осевым направлениям - в продольном, поперечном и по диагонали, а в ходе лазерной резки происходит их высвобождение, что и приводит к значительному искривлению заготовки.

Высокие требования к качеству продукции, предъявляемые рынком, обусловили разработку новых высокотехнологичных машин для правки металла. Настройка таких машин крайне сложна и ее успешность зависит, в основном, от опыта оператора. Поскольку в последние годы усиленно развиваются вычислительные ресурсы, в процессе производства особую важность приобретает моделирование, которое используется для анализа влияния параметров правильных машин на плоский металлопрокат.

С применением программного комплекса SIMULIA Abaqus была создана модель листоправильной машины фирмы «LDM», которая имеет в своем составе 15 рабочих роликов. Для моделирования процесса правки были использованы свойства стали толщиной 3мм марки S355MC.

В ходе анализа параметров процесса правки был сделан вывод об их влиянии на остаточные напряжения в металле и выданы рекомендации по настройке листоправильной машины в производстве.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗКАХ**

**Витохин Е.Ю., Онищук В. С., Скворцова А. Е.,  
Федоров И.В., Цейтлин Б.В.**

*АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», г. Санкт-Петербург*

В представленной работе рассмотрены вопросы моделирования напряженно-деформированного состояния железобетонных резервуаров при действии температурных нагрузок с использованием программного комплекса ABAQUS. В случаях экстремально высоких и низких температур особенно важно учитывать нелинейный характер термомеханического поведения бето-

на и арматуры. В ходе исследования были проведены теплотехнические расчеты, учитывающие нелинейные зависимости свойств бетона от температуры, конвективный и лучистый теплообмен. Результаты теплотехнических расчетов использовались для нахождения напряженно-деформированного состояния конструкции. В разработанной модели учитывались нормативные двух- и трехлинейные диаграммы деформирования бетона, напрягаемой и ненапрягаемой арматуры при растяжении и сжатии. Учет нелинейности свойств бетона был выполнен в рамках модели материала Concrete Damaged Plasticity, а описание свойств металла арматуры – с использованием подпрограммы UMAT. Армирование моделировалось с использованием элементов мембраны с приведенными ортотропными свойствами. Свайное основание моделировалось ортотропной средой, характеристики которой учитывают свойства грунта и свай.

## **ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЗДАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАКСИМАЛЬНОГО РАСЧЁТНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

**Чаускин А. Ю.**

*ЗАО НИЦ «СтаДиО», г. Москва*

**Пшеничкина В. А.**

*ИИиС ФГБОУ ВО ВолгГТУ, г. Волгоград*

В настоящее время расчёт зданий и сооружений на сейсмическое воздействие уровня МРЗ регламентируется достаточно сложными техническими требованиями, такими как учёт нелинейной работы материала и расчёт во временной области. Обеспечение отсутствия повреждений зданий и сооружений при расчёте на МРЗ экономически не целесообразно, но критерий отказа объекта и количественный уровень сейсмического риска при проектировании остаются неопределёнными.

Произведён расчёт идеализированных сейсмостойких систем башенного типа в программном комплексе Abaqus на сейсмическое воздействие уровня «максимальное расчётное землетрясение» в детерминированной постановке методом прямого интегрирования уравнений движения (Abaqus/Explicit) с учётом физической нелинейности материала и его повреждения (модель материала Concrete Damaged Plasticity). Определены несущие частоты собственных колебаний модели и их изменение во время сейсмического воздействия, для чего был разработан алгоритм перезаписывания свойств каждого конечного элемента. Методами дифференциального исчисления был произведён анализ аппроксимирующей функции изменения собственной частоты колебаний, получены графики скорости и ускорения изменения частоты собственных колебаний.

На основании полученных результатов методом статистических испытаний при решении МКЭ-задач разработана методика вероятностного расчёта

нелинейных стационарных систем на действие сейсмической нагрузки. Линеаризация системы проводилась методом канонических разложений. Погрешность линеаризации составила не больше 0,5%. Получены выходные характеристики нелинейных систем в зависимости от времени: амплитудно-частотные характеристики, спектральные плотности, дисперсия и стандарт относительных перемещений системы, коэффициент динамичности. По полученным результатам сделан вывод о достаточно хорошем соответствии результатов аналитического и численного моделирования при решении вероятностной задачи.

Оценка надёжности рассматриваемой нелинейной системы проводилась на основе теории выбросов. В результате расчёта получено: условная вероятность отказа составляет 58,6 %, полная вероятность отказа с учётом вероятности возникновения землетрясения на данной площадке карте «В» составляет 5,6 %. Приемлемое значение вероятности отказа по условному риску должно приниматься индивидуально для проектируемого объекта, исходя из экономических, социальных и других показателей.

## **ПАЦИЕНТ-СПЕЦИФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ТРАНСКАТЕРНЫХ БИОПРОТЕЗОВ КЛАПАНА АОРТЫ**

**Овчаренко Е.А., Клышников К.Ю.**

*НИИ КПССЗ, г. Кемерово*

Работа посвящена созданию метода численной оценки результатов имплантации транскатетерных биопротезов клапана аорты с использованием данных мультиспиральной компьютерной томографии конечного пациента и модели каркаса протеза, полученного методом микро-компьютерной томографии. Математическая модель материала каркаса протеза (сверхэластичный никелид титана) реализована в среде инженерного анализа ABAQUS с использованием встроенной сабрутины UMAT на базе модели Ауриччио. Корректность применения данной модели материала верифицировали серией постановочных тестов в универсальной испытательной машине Zwick/Roell (Германия). Для моделирования имплантации был выбран решатель Abaqus/Explicit. Для демпфирования динамических эффектов использовано вязко-эластическое давление на внутреннюю поверхность модели аорты. Ошибка моделирования оценена с использованием разработанного алгоритма, определяющего отклонение координаты модели балки каркаса по результатам моделирования от контрольных данных, реализованного в ПО Matlab. Результаты моделирования продемонстрировали высокое соответствие с данными контрольной ангиографии.

**Моделирование процессов обработки металлов давлением и  
термической обработки в DEFORM и JMatPro**

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА МАГИСТРАТУРЫ «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ В ОМД»**

**Типалин С.А.**

*ФГБОУ ВО ПОЛИТЕХ, г. Москва*

Образовательная программа разработана на кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета в соответствии с ФГОС 3+ по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение». Срок обучения рассчитана на 2 года.

Программа ориентирована на промышленные предприятия ОПК, автомобилестроения, инжиниринговые компании, связанные с разработкой, исследованием и оптимизацией технологий обработки материалов давлением.

Программа ориентирована на развитие идеологии цифрового производства.

Программа предусматривает Базовую часть, Вариативную часть, Дисциплины по выбору и практики (учебную, производственную, научно-исследовательскую работу и преддипломную).

По окончании курса предусмотрена защита выпускной квалификационной работы.

Программа включает в себя дисциплины изучаемые в течение 2484 часов, из них аудиторные занятия составляют 914 часов.

Обучение рассчитано, как для бакалавров освоивших базовый курс по направлению «Машиностроения», так и для профессионалов, желающих совершенствовать свое техническое и проектное мастерство в области компьютерного инжиниринга связанного с обработкой листовых материалов. Так же обучение будет полезно и для тех, кто уже работает в промышленности, как предприниматель и планирует значительно улучшить эффективность своего бизнеса, а также тем, кто планирует создать собственную компанию, или реализовать проект в направлении связанном с пластической обработкой материала.

Учебный план направлен на сохранение и развитие лучших традиций высшей школы, и подготовку магистров способных не только самостоятельно решать повседневные технические задачи на производстве, но и выполнять новые исследования направленные на совершенствование технологических процессов, штамповой оснастки и оборудования.

Особенность обучения в магистратуре по направлению «Технологический инжиниринг в обработке материалов давлением» заключается в его направленности на создание и моделирование процессов штамповки. Студенты получают навыки по моделированию технологических процессов листовой штамповки с использованием современных программ

Autoform/StamPACK/PamStamp. Для сложных процессов штамповки и моделирование комбинированных процессов студенты используют среды Abaqus/ANSYS/Forming. (программы рассчитаны на выбор студента)

Современное производство все шире использует аддитивные технологии для создания новых изделий и новых технологических процессов. В связи с этим студенты обучающиеся по нашему плану обязательно изучают процессы связанные аддитивным производством прототипов и получают навыки работы с технологическими процессами на основе аддитивных технологий.

Кроме того, преподаватели обучают студентов методам и алгоритмам теории решения изобретательских задач в области исследования и разработок, расскажут о правовых и юридических аспектах и о вопросах защиты авторского права.

Целями программы являются подготовка магистров в области компьютерного инжиниринга в новых производствах ориентированных на потребности современной промышленности и формирование у обучающихся понимания творческих механизмов работы специалистов в современных производствах, а также взаимодействие с между фирмами в бизнесе.

Учебный план придерживается принципов сочетания теоретических знаний, инновационных и традиционных практик.

Программа интегрирует в региональное и мировое профессиональное сообщество. Студенты обучающиеся в магистратуре по данной программе имеют возможность прохождения практики с дополнительным обучением в Университетах Германии с последующим получением двойного диплома.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕРИЛЛИЕВЫХ ОКОН ПРИ ИХ РАБОТЕ В ДЕТЕКТОРАХ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Мишин В.В., Шишов И.А.**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург*

Целью работы являлась оценка работоспособности (т.е. способности выдерживать многоцикловые нагрузки без признаков разрушения) бериллиевого окна в детекторе рентгеновского излучения.

Бериллиевые окна представляют собой фольги круглой формы толщиной 0,008-0,03 мм, которые впаяны или вклеены в корпус детектора [1]. В процессе эксплуатации детектора бериллиевое окно подвергается воздействию циклической нагрузки внешним давлением величиной 1 - 1,2 атм, что вызывает деформацию фольги [2,3,4]. Бериллий – хрупкий материал, поэтому даже незначительная пластическая деформация может вызвать разрушение бериллиевого окна, что приведет к выходу детектора из строя.

Оценку напряженно-деформированного состояния круглого бериллиевого окна в процессе работы в детекторе рентгеновского излучения в условиях циклического нагружения выполняли в программном продукте *Abaqus* с учетом реологических свойств бериллия [5,6,7] и геометрических параметров бериллиевого окна. В результате моделирования были получены поля распределения напряжений, перемещений и интенсивности деформации в бериллиевых окнах с различными геометрическими параметрами, а также установлен характер изменения напряженно-деформированного состояния с течением времени (т.е., при нарастании количества циклов нагружения).

Вероятность разрушения оценивали с помощью критерия разрушения по предельным деформациям. Была разработана методика определения предельных значений критерия, представляющая собой сочетание тестов фольги на изгиб до разрушения и компьютерного моделирования процесса изгиба.

В результате работы создана эмпирическая модель, позволяющая оценить вероятность разрушения тонких бериллиевых окон в детекторах рентгеновского излучения в зависимости от их геометрических параметров, приложенного давления и пластических свойств бериллия. Опытное тестирование образцов фольги толщиной 0,008 мм, имеющих различные пластические свойства, показало хорошую сходимость предложенной модели с данными экспериментов.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ (соглашение МК-1402.2017.8).*

## **СОЗДАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ НА ПАРОВОЗДУШНОМ МОЛОТЕ**

**Смирнов М.О., Чижик Т.А.**

*ПАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург*

**Золотов А.М., Мишин В.В., Шишов И.А.**

*ФГАОУ ВО СПбПУ, г. Санкт-Петербург*

В работе изложена методика верификации процесса штамповки на паровоздушном молоте согласно экспериментальным данным процесса.

Выполнены исследования реологических свойств стали 15X11МФ-Ш при различных температурах, степенях и скоростях деформации.

Разработана компьютерная модель процесса штамповки поковки турбинной лопатки в пакете *Deform-3D*. Определены необходимые коэффициенты и параметры для обеспечения максимальной сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Выполнен анализ процесса формообразования заготовки при окончательной штамповке. Исследовано влияние параметров процесса на напряженно-деформированное состояние (НДС), формообразование заготовки, температурные поля в заготовке на различных этапах штамповки.

Разработанная компьютерная модель процесса штамповки поковки ло-

патки была использована для последующего моделирования процесса штамповки особо крупной поковки турбинной лопатки при возможности изготовления крупногабаритной штампованной заготовки турбинной лопатки на действующем оборудовании.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ С ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ РЫЛЬНОЙ ЧАСТИ**

**Радюк А.Г., Тилянов А.Е., Скрипаленко М.М., Стойшич С.С.**

*НИТУ «МИСиС», г. Москва*

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.

Целью работы являлось исследовать влияние теплоизоляции торца рыльной части воздушной фурмы на ее температурное поле.

Для достижения поставленной цели провели компьютерное моделирование с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа DEFORM-2D. Геометрию элементов модели создавали в SolidWorks, затем загружали в DEFORM-2D, позиционировали, задавали начальные и граничные условия.

Была создана модель для оценки влияния теплоизоляции торца рыльной части воздушной фурмы на ее температурное поле. Исследовано влияние высоты выступа в рыльной части, защищающего теплоизоляцию от разрушения при транспортировке и установке фурмы в печь, и толщины теплоизоляции на температурное поле фурмы. Теплоизоляция, установленная на торец рыльной части, изготовленной с выступом, длина которого превышает толщину теплоизоляции, имеет высокий срок службы и повышает стойкость фурм по прогару при низких значениях тепловых потерь.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗКИ ТОНКОЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА**

**Почекуев Е.Н., Шенбергер П.Н.**

*Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти*

В работе представлено исследование процесса разделения тонколистовых заготовок из низкоуглеродистого материала и разработка комплекса мероприятий, обеспечивающих получение полуфабрикатов необходимого качества поверхности реза с помощью DEFORM-2D.

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния материала при плоской деформации в зоне реза. Процесс разрушения заготовки контролировался на основе критерия Cockroft & Latham.

Приводится описание этапа образования скалывающей трещины для различной величины зазоров в допустимом интервале значений.

Отмечено, что первая скалывающая трещина возникает у вершины угла режущей кромки ножа секции верха и распространяется в направлении к режущей кромки секции низа. Результаты расчета показали, что направление распространения трещин для рассматриваемых величин зазоров имеет различную траекторию.

Численный анализ 2D-операции резки и сопряженной задачи с учетом деформирования инструмента позволил установить степень влияния усилия деформирования и прижима на величины упругой деформации ножей и значение зазора.

Совместное влияние упругих деформаций верхнего и нижнего ножа приводит к изменению величины зазора в пределах его допуска. Величина смещения под действием упругих сил составляет от 20,2 до 32,8 % допуска на величину зазора, под влиянием прижима – от 3,3 до 4,3 %.

Полученные результаты показали, что значительное влияние на колебания величины зазора между режущим инструментом оказывает действие бокового распирающего усилия. Значение распирающего усилия, воздействующего на верхний нож, на 14 % выше, чем величина распирающей силы воздействия на нижний нож.

Выполнена оценка качества профиля реза тонколистовых деталей при осуществлении разделительных операций. Определены зависимости геометрических параметров профиля реза от величины зазора и усилия прижима. Предложены методы выбора параметров процесса и управления качеством заготовки.