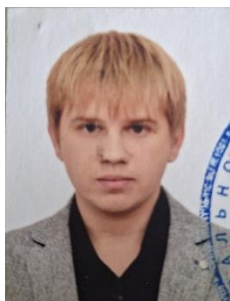


ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ИХ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ В FLOWVISION



П. А. Гузикас, студент
E-mail: guzikaspavel@gmail.com
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический
университет»

В. М. Филиппова, аспирантка
E-mail: fvm@balt-energo.ru
АО «Всероссийский теплотехнический институт»

С. В. Юрков, доцент
E-mail: sergej.yurkov@klgtu.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Решается задача комплексного проектирования энергетического газотурбинного двигателя на базе прототипа. На стадии технического проекта выполняется оптимизация параметров рабочего процесса и проектно-конструктивных решений на основе численного моделирования физических процессов, в том числе протекающих в камере сгорания ГТУ. Подобные процессы в условиях, максимально приближенных к реальным, в том числе в части конструктивной детализации физической области, занятой процессом, требуют применения специального программного инструмента, такого как Ansys Fluent, FlowVision и др., использующих CAD-модели элементов конструкции для расчетной области моделируемого процесса. В статье исследуется проблема прямого переноса детализированных конструкторских сборок из САПР Компас-3D в CFD-среды на примере программного комплекса FlowVision. Представлена авторская методика поэтапной подготовки CAD-геометрии, включающая анализ физической постановки задачи, целевое упрощение конструкции, топологическую диагностику и формирование вычислительной области. Методика апробирована на модели камеры сгорания газовой турбины SGT-100. В ходе исследования выявлены типовые геометрические дефекты, препятствующие генерации качественной расчетной сетки, и разработаны алгоритмы их устранения. Результаты численного эксперимента подтвердили, что применение предложенного подхода позволяет избежать ошибок дискретизации и получить физически достоверные поля давлений и скоростей. Разработанный алгоритм может быть интегрирован в стандартные инженерные практики проектирования энергетического оборудования.

Ключевые слова: камера сгорания, SGT-100, КОМПАС-3D, FlowVision, CFD-моделирование, CAD-модель, гидрогазодинамический расчет.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования заключается в разработке и практической апробации систематизированной технологии подготовки CAD-моделей, обеспечивающей повышение устойчивости, точности и вычислительной эффективности CFD-расчетов в программном комплексе FlowVision.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использован комплекс теоретических, вычислительных и инженерно-аналитических методов:

1. Геометрическое моделирование и параметрическое упрощение в среде КОМПАС-3D (удаление технологических элементов, аппроксимация сложных криволинейных поверхностей, объединение смежных тел).
2. Топологическая диагностика с применением автоматизированных средств проверки на коллизии, анализ зазоров и пересечений граней.
3. Вычислительный эксперимент: построение вычислительной области (булево вычитание), генерация расчетной сетки, задание граничных условий и выбор замыкающих моделей турбулентности в препроцессоре FlowVision.
4. Численное моделирование стационарного трехмерного течения на основе уравнений Навье – Стокса с последующей верификацией решения.
5. Визуализация и постпроцессинг полученных полей давлений, скоростей и траекторий потока, а также сравнительный анализ результатов с проектными характеристиками объекта.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вычислительная гидрогазодинамика (CFD) является неотъемлемым инструментом проектирования и оптимизации технических систем. Программные комплексы, такие как FlowVision, позволяют моделировать трехмерные течения жидкостей и газов на основе уравнений Навье – Стокса, уравнения состояния и дополнительных моделей, учитывающих турбулентность, теплоперенос, фазовые переходы и пористость сред [1, 2, 5]. Однако эффективность и точность CFD-расчетов напрямую зависят от качества исходной геометрической модели.

Системы автоматизированного проектирования (САПР), например КОМПАС-3D, широко применяются для создания детализированных конструкторских сборок в машиностроении, авиастроении, энергетике и других отраслях [6]. Прямой перенос таких сборок в CFD-среду, как правило, нецелесообразен из-за избыточной детализации, наличия технологических элементов, не влияющих на гидродинамику, а также топологических дефектов, приводящих к ошибкам при построении сетки. В связи с этим актуальной задачей является разработка систематизированного подхода к подготовке вычислительных моделей течения. Целью данной работы является описание технологии преобразования САД-сборок в расчетные модели для FlowVision, а также анализ типовых проблем и методов их устранения на примере воспроизведенной авторами средствами САПР Компас-3D точной геометрии камеры сгорания газовой турбины SGT-100, которая изображена на рисунке 1.

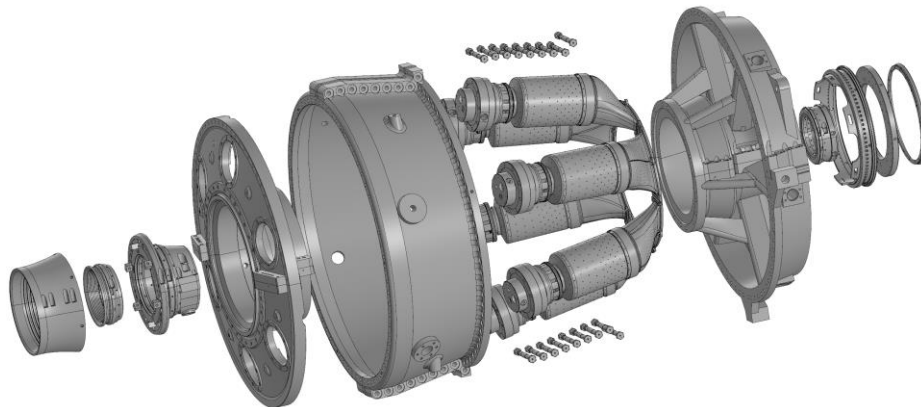


Рисунок 1 – Камера сгорания SGT-100

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является камера сгорания промышленной газовой турбины Siemens SGT-100. Данный узел выбран вследствие сложной внутренней конфигурации, наличия множественных рядов охлаждающих отверстий, завихрителей и топливных магистралей, а также строгого требования к равномерности распределения воздушного потока. Использование данного объекта позволяет наглядно продемонстрировать эффективность предлагаемой методики подготовки геометрии, оценить ее влияние на качество расчетной сетки и подтвердить физическую достоверность результатов гидрогазодинамического моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика подготовки вычислительной модели. Работа по адаптации геометрической модели для гидрогазодинамического расчета выполняется в несколько этапов:

1. Анализ и выделение расчетной зоны. Исходная технологическая сборка изучается с точки зрения физики процесса. Определяются узлы и полости, непосредственно участвующие в формировании потока, после чего они извлекаются из общей сборки в виде отдельной детали или под сборки. На рисунке 2 необходимая зона выделена красным прямоугольником.

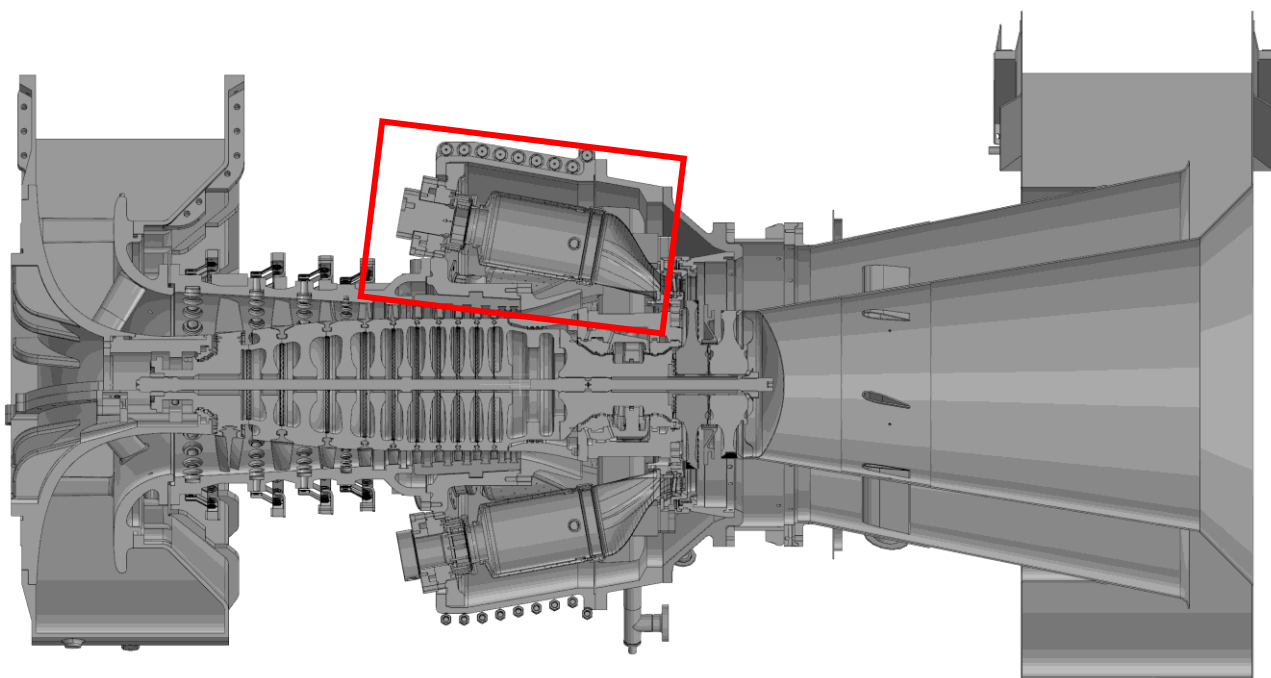


Рисунок 2 – Выделение расчетной зоны

2. Упрощение геометрии. Выполняется удаление элементов, не влияющих на гидродинамику: крепежных изделий (обозначены красной областью на рисунке 3), технологических отверстий, фасок и скруглений малого радиуса [4]. Мелкие конструктивные элементы (обозначены коричневой областью на рисунке 3), прилегающие к основным поверхностям, объединяются с крупными телами. Сложные криволинейные поверхности (пример такой поверхности обозначен на рисунке 3 черной областью), сформированные операцией «выдавливание по сечениям», аппроксимируются путем удаления промежуточных сечений, не вносящих существенного изменения в форму канала, либо замены группы сечений одним эквивалентным промежуточным сечением.

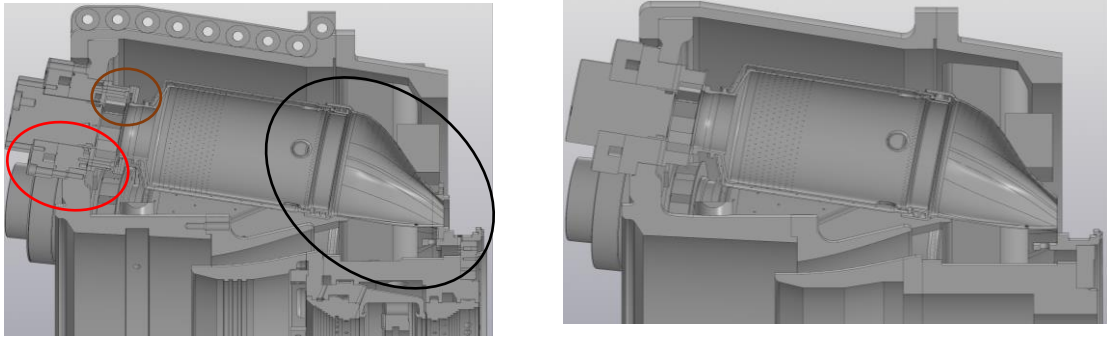


Рисунок 3 – Упрощение геометрии модели

3. Контроль топологии. После упрощения модель проверяется на наличие недопустимых зазоров, пересечений и наложений тел. В КОМПАС-3D для этого используется инструмент «Проверка на коллизии» (рисунок 4). Обнаруженные дефекты устраняются на уровне исходной сборки до перехода к следующему этапу.

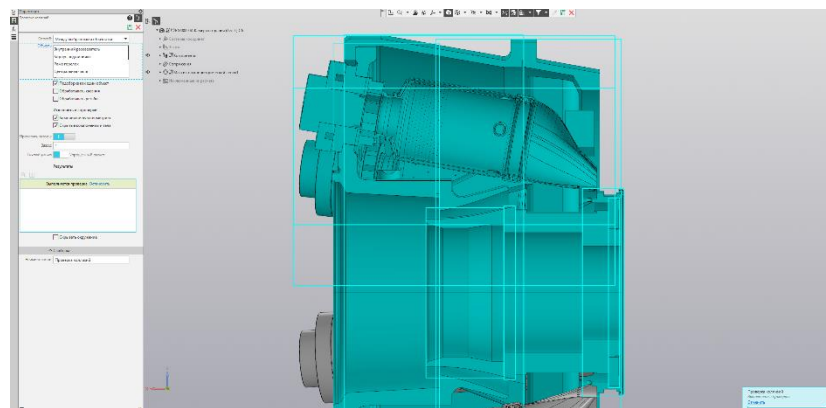


Рисунок 4 – Контроль топологии

4. Формирование вычислительной области течения. Поскольку FlowVision работает с объемом, занимаемым рабочей средой, а не с твердыми телами, создается габаритный объем, полностью охватывающий подготовленную сборку. С помощью булевой операции (рисунок 5) вычитания форма сборки исключается из габаритного объема, в результате чего формируется полость, соответствующая области течения жидкости или газа.

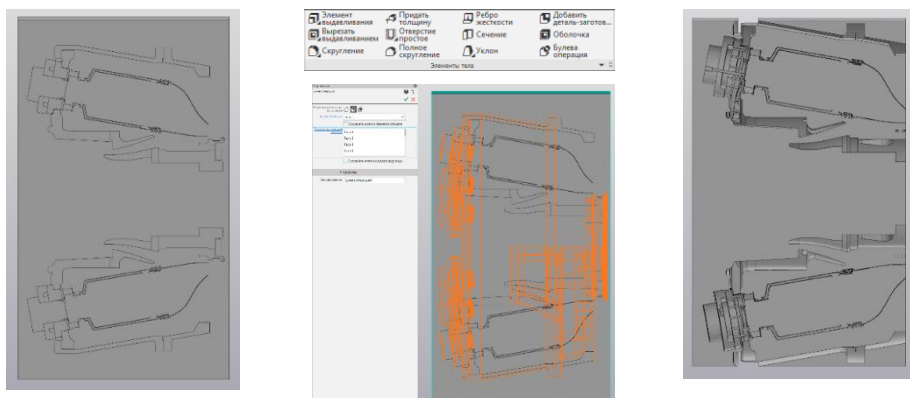


Рисунок 5 – Результат булевой операции

5. Устранение дефектов булевых операций. После логических операций могут оставаться изолированные полости, некорректные стыки или микроразрывы поверхностей. Выявленные аномалии устраняются инструментами редактирования тел (локальное выдавливание, сшивание поверхностей, ручное исправление швов). Результат устранения дефектов булевой операции представлен на рисунке 6.

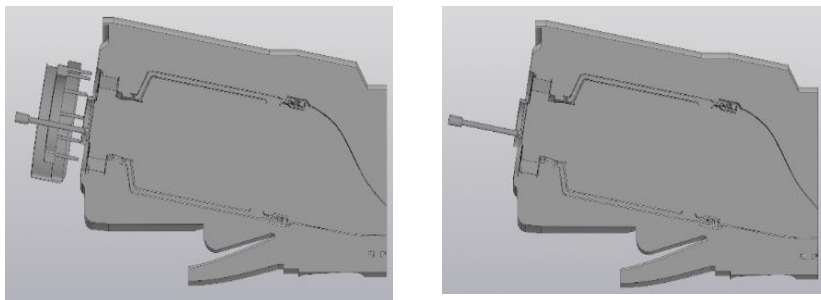


Рисунок 6 – Устранение дефектов булевой операции

6. Экспорт и настройка в FlowVision. Готовая модель течения сохраняется в формате «деталь» (рекомендуемый формат: VRML), так как FlowVision не поддерживает импорт сборок. При импорте возможны искажения геометрии, вызванные сложными криволинейными участками или остаточными зазорами; в этом случае выполняется возврат на этап 3–4 для дополнительной коррекции.

После успешного импорта начинается препроцессинг в FlowVision: построение расчетной сетки, задание граничных условий, выбор моделей турбулентности и, при наличии, определение границы раздела фаз [3]. Для снижения вычислительной нагрузки на этапе отладки допускается использование крупноячеистой сетки с последующим локальным сгущением в зонах высоких градиентов.

При наличии осевой или периодической симметрии расчет может проводиться для одного повторяющегося сектора с заданием соответствующих граничных условий. После завершения настройки запускается гидрогазодинамический расчет, результаты которого визуализируются в виде полей параметров и графиков изменения характеристик.

В данном примере рассматривалась продувка камеры сгорания холодным воздухом. На рисунке 7 представлены полученные поля давлений и скоростей. Проведен анализ аэродинамики течения в камере сгорания. По результатам расчетов установлено, что направление движения потока соответствует проектным параметрам, образование нежелательных вихревых зон отсутствует. Воздух равномерно поступает через охлаждающие отверстия, что свидетельствует о корректности подготовленной геометрической модели и выбранных граничных условий. Распределение скоростей и давлений по объему камеры сгорания характеризуется плавным изменением без локальных скачков, что подтверждает адекватность примененной расчетной сетки.

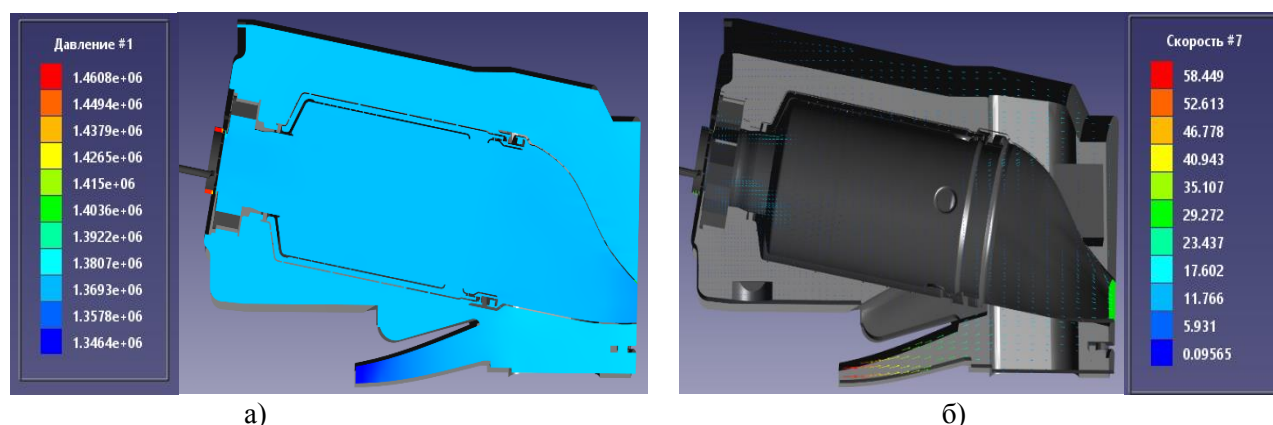


Рисунок 7 – Полученные поля давлений и скоростей: а – цветограмма распределения давления; б – векторное поле скоростей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена 3D модель трубчато-кольцевой камеры сгорания двигателя-прототипа (SGT-100).
2. Разработан алгоритм и выполнена подготовка геометрической модели течения компонентов химически реагирующей топливно-воздушной смеси для выполнения CFD-расчетов.
3. Выполнен контрольный расчет течения без учета горения, позволяющий сделать следующие выводы: представленный алгоритм подготовки геометрических моделей обеспечивает корректное формирование вычислительной области для CFD-расчетов в FlowVision. Систематическое упрощение CAD-геометрии, контроль топологии и применение булевых операций позволяют минимизировать ошибки генерации сетки и снизить время расчета без потери физической достоверности. Практическая апробация методики на модели камеры сгорания SGT-100 подтвердила ее эффективность при решении задач промышленной гидродинамики. Дальнейшее развитие подхода может быть направлено на автоматизацию этапов упрощения геометрии и валидацию расчетных данных экспериментальными исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов / Л. Г. Лойцянский. – Изд. 7-е, перераб. и доп. – Москва: Дрофа, 2003. – 848 с. – ISBN 5-7107-6408-2.
2. Андерсон, Дж. Вычислительная гидрогазодинамика. Введение в метод конечных разностей / Дж. Андерсон; пер. с англ. – Москва: Мир, 1990. – 384 с.
3. Туснин, А. В. Методика построения конечно-элементной сеточной модели на примере камеры сгорания газотурбинного двигателя / А. В. Туснин, С. А. Шаламов, В. Г. Августинович // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 33. – С. 40–52 [24].
4. Туголуков, И. Н. Подготовка геометрических моделей для CFD-расчетов: методы упрощения и контроля топологии / И. Н. Туголуков, А. В. Сидоров // Вестник машиностроения. – 2021. – № 8. – С. 45–50.
5. FlowVision: Руководство пользователя. Версия 3.12 / ООО «ТЕСИС». – Москва, 2024. – 450 с. – Доступ из справочной системы FlowVision [11–12].
6. Система автоматизированного проектирования КОМПАС-3D: Руководство пользователя. Версия 22 / АО «АСКОН». – Санкт-Петербург, 2023. – 380 с.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF PREPARATION OF PHYSICAL MODELS OF FLOW FOR CALCULATION OF THEIR HYDROGAS DYNAMICS IN FLOWVISION

P. A. Guzikas, Student
E-mail: guzikaspavel@gmail.com
Kaliningrad State Technical University

V. M. Filippova, Postgraduate Student
E-mail: fvm@balt-energo.ru,
All-Russian Thermotechnics Institute

S. V. Yurkov, Associate Professor
E-mail: sergej.yurkov@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

The integrated design of a gas turbine power plant (GTE) based on a prototype is being addressed. At the technical design stage, the operating parameters and design solutions are optimized

using numerical simulations of physical processes, including those occurring in the GTE combustion chamber. Such processes, under conditions as close to real-life as possible, including the design detailing of the physical region occupied by the process, require the use of specialized software tools such as Ansys Fluent, FlowVision, and others, which utilize CAD models of structural elements for the computational domain of the simulated process. The article examines the problem of direct transfer of detailed design assemblies from CAD to CFD environments using the example of the FlowVision software package. The author's method of step-by-step preparation of CAD geometry is presented, including analysis of the physical formulation of the problem, targeted simplification of the design, topological diagnostics and the formation of a computational domain. The technique has been tested on the SGT-100 gas turbine combustion chamber model. In the course of the study, typical geometric defects have been identified that prevent the generation of a high-quality computational grid; and algorithms for their elimination have been developed. The results of the numerical experiment confirmed that the application of the proposed approach makes it possible to avoid sampling errors and obtain physically reliable pressure and velocity fields. The developed algorithm can be integrated into standard engineering practices for designing energy equipment.

Keywords: *Combustion chamber, SGT-100, COMPASS-3D, FlowVision, CFD modeling, CAD model, hydrogasdynamic calculation.*