

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Соломатина Романа Сергеевича «Численное моделирование процессов высокоскоростного смешения и горения в неоднородных топливно-воздушных смесях» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертации Соломатина Р.С. посвящена созданию комплекса программных модулей для расчетов высокоскоростных течения реагирующих смесей и демонстрации его возможностей при моделировании сложного процесса в камере сгорания Барроуса-Куркова. Для обеспечения работы такого комплекса был выполнен подбор и реализация нескольких моделей течения многокомпонентной смеси в сочетании с моделью химических реакций в ней. Сильная зависимость скорости протекания химических реакция от локальных параметров течения приводит к существенным ошибкам при использовании моделей течения на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Роман Сергеевич учел это в своей работе, включил в программный комплекс и использовал при демонстрации его возможностей вихреразрешение.

Диссертация представлена на 191 странице содержит введение, пять глав, заключение, список литературы и одно приложение.

**Во введении** обстоятельно описана степень научной разработанности темы, свидетельствующая о ее высокой актуальности и сложности. Приведены примеры двигателей, использующих в своем цикле высокоскоростное горение. Дан обзор подходов к описанию турбулентности, как одного из ключевых элементов для задач, решаемых созданным комплексом программных модулей. Так же присутствуют необходимые подразделы формулирующие цели работы, обосновывающие научную новизну и значимость, подтверждающие достоверность результатов и перечисляющие положения, выносимые на защиту.

**Главе 1** называется «Модель турбулентного смешения в сверхзвуковых газовых потоках» и содержит формулировки систем дифференциальных уравнений, на которых построены используемые в работе методы описания течения газа. Так же глава содержит подробные пояснения к уравнениям. Для замыкания уравнений RANS используется модель Спаларта-Аллмараса, а для вихреразрешающих расчетов метод IDDES на основе этой модели. Роль подсеточной модели LES в качестве получаемых результатов значительно ниже роли модели турбулентности для RANS, программные модули разработаны с акцентом на вихреразрешение, что в совокупности обосновывает рассмотрение в рамках работы только одной модели турбулентности. Глава заканчивается

формулировкой общего вида системы, используемой в работе для описания течения многокомпонентной смеси.

**Глава 2** называется «Модель химических реакций. Детальный кинетический механизм». Она содержит небольшую вводную часть, указывающую на основные проблемы при моделировании реакций в многокомпонентных смесях и определяющую используемый кинетический механизм на основе анализа литературы. Так же в главе дается описание системы уравнений выбранного механизма. Заканчивается она описанием алгоритмов совместного счета газодинамического и кинетического модулей разных для стационарного и нестационарного случаев. Для нестационарного случая алгоритм объединения представляет собой последовательный счет шага газодинамической системы на  $i$ -ом шаге и расчет приращений компонент, связанных с реакциями от полученного состояния. Для стационарных уравнений используются источники концентраций и энергии от реакций для газодинамической системы, уточняемые при ее решении методом установления.

**Глава 3** называется «Используемые численные методы и особенности реализации» и посвящена описанию численных схем, применяемых в созданных модулях. Расчетные схемы для уравнений движения и кинетического механизма существенно отличаются в следствии качественного различия самих уравнений, так уравнения движения формулируются через пространственные частные производные, а система кинетического механизма зависит только от локальных параметров и является системой обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом скорости химических реакций пропорциональны как минимум квадратам концентраций, которые зачастую меняются от около нулевых значений, что приводит к быстрому изменению скорости реакций. Вышесказанное обуславливает разные подходы к решению газодинамической и кинетической систем.

Схема для решения газодинамической системы является конечно объемной по пространству с линейным представлением параметров в ячейках и процедурой распада разрыва на гранях. Для снижения диссипативности схемы в вихреразрешающих расчетах используется взвешивание результатов, полученных в процедуре распада разрыва с центральными разностями больших величин. По времени используются сочетание схемы Кранка - Николсон и схемы Меньшова Накамуры, одна из которых связывает  $n$  и  $n+1$  слой без промежуточных, всегда неявная и имеет второй порядок по времени, а вторая является схемой предиктор – корректор и может становиться явной схемой второго порядка в зависимости от поля параметра  $\omega$ . Кроме того, при использовании неявной схемы возникает потребность в решении системы линейных алгебраических уравнений с разреженной матрицей. Для этого автор комбинирует методы LU разложения,



сглаживания невязки и GMRES. Несмотря на то что каждый элемент этой части разработанного комплекса модулей ранее опубликован, получение их удачной комбинации является заслугой Романа Сергеевича и обладает научной новизной.

Для решения системы кинетического механизма автор использует программу DLSODE реализующую метод Гира и дает пояснения к методу. Такое решение имеет ряд преимуществ особенно в свете того что результатом работы является комплекс программных модулей. При их использовании в дальнейшем будет легко заменить кинетический механизм с гарантией высокого качества и численной эффективности решения, наследуемой от DSOLDE.

**Глава 4** называется «Верификация и валидация разработанной модели» и содержит описания и результаты решения ряда модельных задач.

Для проверки работы кинетического механизма были смоделированы воспламенения водородо-воздушной смеси и структура одномерной детонационной волны. Все полученные результаты сопоставлены с экспериментом и расчетами других авторов.

Для проверки работы модели течения газа были проведены ряд стационарных расчетов в постановке RANS начиная с турбулентного пограничного слоя. Кроме сопоставления результатов с другими расчетами и экспериментами была выполнена оценка влияния метода решения системы линейных алгебраических уравнений на необходимый для задачи вычислительный ресурс. На основе анализа метод LU-SGS был выбран основным для решения системы линейных уравнений.

Так же в главе описан вихререзающий расчет развитого турбулентного сверхзвукового течения в канале прямоугольного сечения. В следствии однородности течения по длине канала оно может быть описано в рамках относительно короткого участка с условиями периодичности по продольной координате и дополнительным источником. Источник необходим для компенсации потоков трения на стенках и дает возможность получить статистически установившееся решение. В задаче он вводился в форме градиента давления. Были проведены и сопоставлены расчеты по гибридным вариантам схем Кранка – Николсон и Меньшова Накамуры, первая из которых позволила сохранить более мелкие структуры. Из сопоставлений представлены только профили осредненной скорости для RANS и IDDES-SA с разными схемами по времени.

**Глава 5** посвящена демонстрации возможностей созданных программных модулей на примере решения задачи о смешении в модельной камере сгорания Барроуса Куркова и задачи о смешении и горении в этой камере. Задача решалась в разных постановках от двумерного RANS до IDDES. В расчете IDDES для экономии ресурсов вводились

существенные упрощения. Верхняя стенка была заменена на условие не протекание с проскальзыванием, а для боковых использовалось условие периодичности. Такие упрощения позволили обойтись сеткой в 11.2 миллиона ячеек для IDDES расчетов. Для вихреразрешающих расчетов использовалась гибридная явно – неявная схема с шагом по времени 15 наносекунд что приводило к ее работе в явном режиме во всей LES области. В главе приведен ряд иллюстраций течения и выполнены сопоставления расчетов с экспериментом и между собой. Можно отметить что профили полной температуры для RANS расчетов течения с горением несколько лучше соответствуют эксперименту чем профили, полученные из IDDES. Предположения о причинах такого различия присутствуют в главе.

Автореферат отражает содержание диссертации

По результатам рассмотрения работы можно сделать следующие замечания

1. При рассмотрении модельных задач мало внимания уделяется вихреразрешающим расчетам.
2. Для задачи о развитом турбулентном течении в прямоугольном канале не представлены разрешаемые компоненты тензора Рейнольдсовых напряжений и осредненные поля скоростей (появляются ли вторичные токи в угол?). Источник в форме градиента давления должен приводить к подводу энергии к потоку, подробности о его введении отсутствуют в работе.
3. Расчет приращений от реакций на основе  $n+1$  слоя газодинамической схемы приводит к снижению итогового порядка аппроксимации по времени до первого.

Указанные недостатки не снижают научную ценность диссертации Соломатина Романа Сергеевича. Тема безусловно является актуальной с высоким уровнем научной проработки. Автором изучены запрограммированы, опробованы, множество подходов к описанию течения реагирующей газовой смеси, от уравнений до программных реализаций гибридных расчетных схем. На основе работы сформировано представление о наилучшем сочетании этих элементов для решения рассматриваемых в работе задач, что содержит научную новизну. Достоверность полученных расчетных данных подтверждается сопоставлениями с экспериментом и другими расчетами. Важно, что Роман Сергеевич продемонстрировал умение внедрять создаваемые модули в существующий комплекс программ и использовать модули других разработчиков, потому что именно в результате такой работы может возникнуть и развиваться комплекс, востребованный пользователями. Диссертация является законченным научным исследованием, соответствует паспорту специальности и требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее



автор Соломатин Роман Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв составил старший научный сотрудник  
отдела 017 ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»  
кандидат физико-математических наук  
111116 Москва ул. Авиамоторная 2  
[vashorstov@ciam.ru](mailto:vashorstov@ciam.ru)

 18.11.2022  
Шорстов Виктор Александрович

Подпись Шорстова В.А. удостоверяю:  
Ученый секретарь

 Джамай Екатерина Викторовна



Контактные данные: Федеральное автономное учреждение «Центральный институт  
моторостроения имени П.И. Баранова»  
Адрес: 111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, 2.  
Телефон: +7 (495) 362-93-11.  
E-mail: [vashorstov@ciam.ru](mailto:vashorstov@ciam.ru).  
Сайт организации: <http://ciam.ru/>