

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Соломатина Романа Сергеевича «Численное моделирование процессов высокоскоростного смешения и горения в неоднородных топливо-воздушных смесях», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

В диссертации Соломатина Романа Сергеевича представлен новый опыт создания, реализации в программе, верификации и валидации расчетно-теоретической модели высокоскоростных течений с горением предварительно перемешанных реагентов. Хотя работы в данном направлении ведутся давно, создание таких средств численного моделирования турбулентных течений с горением является по-прежнему весьма актуальной задачей, поскольку надежных средств решения данного класса задач пока нет. Это связано и со сложностью задачи, отличающейся нелинейным взаимодействием разномасштабных факторов, и отсутствием надежных физико-математических моделей для описания явления, и недостаточно разработанными численными методами (особенно если говорить о вихререзающих подходах, которые рассматриваются в данной работе), и с отсутствием точных аналитических решений сколько-нибудь реальных задач, которое нужно для верификации программ, и с дороговизной и сложностью эксперимента, необходимого для валидации расчетно-теоретических моделей. Имеющиеся коммерческие продукты, такие, как ANSYS Fluent, FASTRAN и др., несмотря на обилие заложенных в них возможностей, являются “черными ящиками”, настроенными на максимально устойчивую работу и потому нередко дающими неадекватные с физической точки зрения результаты – особенно в том сложнейшем классе задач, которому посвящена диссертация Соломатина Р.С. Создание еще одного собственного программного продукта, основанного на новых численных подходах и полностью подконтрольного своему разработчику, можно только приветствовать, особенно когда продукт создается на базе такой уважаемой научной школы, как ИПМ им. М.В.Келдыша РАН.

Диссертация Соломатина Р.С. изложена на 191 странице и состоит из Введения, пяти Глав, заключения, списка литературы из 104 наименований и одного приложения. Результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, из которых 6 - в изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе 2 - без соавторов. Публикации в достаточной степени отражают основные результаты работы.

Во **Введении** после раскрытия актуальности работы и перед ответом на формальные вопросы помещен обширный (29 стр.) обзор предыдущих исследований по тематике диссертации научная новизна работы, в котором перечислены классические эксперименты с предельно простой геометрией,

рассмотрены наиболее известные экспериментальные исследования камер сгорания (с акцентом на отечественные работы – ЦИАМ, ЦАГИ, ФИЦ ХФ РАН), дан краткий обзор истории математического моделирования высокоскоростных течений с горением, рассмотрены преимущества и недостатки основных подходов к описанию турбулентности (DNS, RANS, LES), описаны основные идеи гибридных RANS/LES подходов и представлены бывшие ранее опыты численного моделирования перечисленных ранее экспериментов. Подчеркнута важность модели химической кинетики, используемой в расчетно-теоретической модели, и указано на то, что в последнее время все чаще используются детальные кинетические механизмы с большим числом реакций.

Первая Глава описывает выбранную автором математическую модель смешения в многокомпонентных высокоскоростных турбулентных течениях без химических реакций. Выписана полная система уравнений Навье-Стокса для таких течений, описан результат ее осреднения по времени или по Фавру (уравнения RANS), выписана однопараметрическая модель турбулентности Спаларта-Альмараса (SA), которая (в соответствии с указаниями авторов модели) используется в “несжимаемой” формулировке, описан метод IDDES (Improved Delayed Detached Eddy Simulation), основанный на уравнении SA для модифицированной вязкости, описывающий вклад от не разрешенной в расчете турбулентности. Единственным заметным недостатком этой Главы является неудачное расположение замыкающих соотношений для диффузионных потоков – для потоков импульса и тепловой энергии они выписаны уже в разделе 1.1, а для потоков массы – только в разделе 1.7.

Во **второй Главе** описан используемый кинетический механизм и его интеграция с математической моделью Главы 1. В работе рассматриваются течения с горением водорода в воздухе и выбран детальный механизм А.Керомнеса (22 реакции между 9 веществами), который, по некоторым данным, дает наилучшие результаты в большинстве тестов. Для интеграции химической кинетики и газодинамической модели, описанной в Главе 1, используется схема расщепления, при которой сначала делается газодинамический шаг, включающий конвекцию и диффузию, а потом от полученного состояния делается химический шаг, учитывающий только локальное изменение температуры и парциальных плотностей химических компонент за шаг по времени в результате протекания химических реакций.

Третья Глава посвящена численному методу реализации описанной в первых двух главах физико-математической модели турбулентных течений со смешением и горением. Для выполнения газодинамического шага используется гибридная явно-неявная схема Меньшова-Накамуры, обеспечивающая второй порядок аппроксимации по пространству. При переходе на неявную компоненту порядок гибридной схемы опускается до 1-го. Для получения 2-го порядка по

времени предусмотрена возможность перестройки схемы в схему Кранка-Николсона всюду, кроме тонких пристенных областей с очень большими числами Куранта, где она переводится в неявную схему Эйлера 1-го порядка по времени. Для решения нелинейной системы алгебраических уравнений неявной схемы на каждом шаге по времени используется дуальный шаг по времени. На внутренних итерациях дуального шага применяется линеаризованная неявная схема 1-го порядка по псевдовремени. Для решения возникающей системы линейных уравнений для всей расчетной области используется безматричная реализация метода LU-SGS. Для ускорения сходимости есть возможность применения GMRES-LU-SGS и алгоритма сглаживания невязки. Жесткая система обыкновенных дифференциальных уравнений на химическом шаге решается при помощи метода Гира 2-го порядка аппроксимации по времени. В разработанной автором программе также предусмотрена возможность переключения на низкодиссипативную центрально-разностную аппроксимацию за пределами областей с высокими градиентами давления.

В **Главе 4** сначала описаны тесты для верификации разработанной расчетно-теоретической модели и основанной на ней программы (моделирование горения в реакторе постоянного давления при разных давлениях, температурах и коэффициентах избытка топлива, расчеты структуры одномерной детонационной волны, моделирование турбулентного пограничного слоя на плоской пластине в рамках подхода RANS, численное решение задачи Шу-Ошера о взаимодействии ударную волну с синусоидальным распределением плотности). Эти тесты показали хорошую работу выбранного кинетического механизма в широком диапазоне начальных условий, продемонстрировали возможность использования пристенных ячеек с $y^+ \sim 3$ в расчетах с прилипанием потока, позволили выявить области эффективности методов LU-SGS и GMRES-LU-SGS.

Важное (хотя, по мнению оппонента, неоднозначное) место занимает тест Шу-Ошера, на котором был выбран вариант аппроксимации конвективных потоков, был сделан выбор в пользу низкодиссипативного корректора Nuynh вместо лимитеров и схемы Годунова для решения задачи Римана вместо схемы Русанова. Также выбранная противопоточная аппроксимация была сопоставлена со схемой, которая переключается на центрально-разностную аппроксимацию, и был сделан выбор в пользу противопоточной схемы, которая не порождает малых осцилляций за ударной волной. Этот выбор, основанный на одномерной конвективной задаче, был далее применен в вихреразрешающих подходах, что, с точки зрения оппонента, неверно, поскольку постоянная генерация слабых возмущений является внутренним свойством неустойчивых турбулентных течений, и борьба с этими возмущениями может отрицательно сказаться на описании характеристик турбулентности в вихреразрешающих расчетах.

Также в Главе 4 представлены результаты предварительных валидационных RANS-расчетов, содержащие сопоставление с экспериментом и проверяющие работоспособность программы при описании различных физических процессов: тест Оби с отрывом низкоскоростного потока в асимметричном диффузоре и моделирование слоя смешения с малым дозвуковым перепадом скоростей.

Наконец, представлен тест для метода IDDES – турбулентное течение в прямоугольном канале с переиодическими граничными условиями на входе и выходе с поддерживающим течение градиентом давления для геометрии и режима течения, соответствующих изолятору экспериментальной камеры сгорания в эксперименте Бэрроуза и Куркова. Получено удовлетворительное согласование с результатами RANS-расчетов. Было бы интересно увидеть результаты сравнения LES-расчетов слоя смешения с большим перепадом скоростей, который является элементом рассматриваемой автором основной задачи (эксперимент Бэрроуза и Куркова) и который показал бы способность расчетно-теоретической модели к описанию эффектов сжимаемости турбулентности; но, к сожалению, такие тесты проведены не были.

Последняя Глава 5 посвящена моделированию классического эксперимента Бэрроуза и Куркова на базе подходов RANS и IDDES. К сожалению, в IDDES расчетах из-за ограниченности ресурсов рассматривалась “плоская в среднем” формулировка задачи (периодические граничные условия на боковых границах расчетной области), а верхняя стенка рассматривалась как стенка со скольжением потока. Сначала рассмотрен режим без горения (когда в потоке “технического воздуха” практически нет кислорода), который позволил автору проверить описание смешения и убедиться в пригодности выбранных расчетных сеток. Получено отличное согласование с экспериментом. Продемонстрировано влияние трехмерности (боковых стенок канала). Затем выполнено моделирование режима с горением, в котором RANS-расчеты продемонстрировали отличное согласование с экспериментом, а IDDES-расчеты дали хотя и качественно правильную картину течения, но заметно разошлись с экспериментом.

Автореферат вполне отражает содержание диссертационной работы.

К работе имеется несколько замечаний.

1. В используемой схеме расщепления по физическим процессам сначала определяется изменение параметров системы под действием газодинамического оператора (включающего процессы смешения компонент), а затем от полученного состояния делается локальный химический шаг, учитывающий только вклад от химических реакций. Очевидным недостатком такого подхода является то, что химический оператор, описывающий экспоненциально меняющиеся моды решения,

действует в течение полного шага по времени на систему с другим начальным состоянием (полученным в результате такого же шага по времени на газодинамическом шаге). В существенно нелинейных задачах, к которым относится данный класс течений, расщепление может приводить к падению порядка аппроксимации метода. К сожалению, исследование порядка аппроксимации в работе отсутствует. По мнению оппонента, данный подход является вполне оправданным лишь в задачах с быстрой кинетикой, которая подстраивается под медленные процессы конвекции и диффузии. Однако в сверхзвуковых течениях, которые рассматриваются в диссертации, масштабы кинетики и смешения могут быть сопоставимы.

2. В работе не представлены классические тесты для вихререзающих подходов – “коробка” с изотропной турбулентностью, вихрь Тейлора-Грина. Не показано, какие спектры турбулентности получаются в расчетах, воспроизводится ли в них интервал универсального равновесия, существование которого является условием применимости метода LES. Согласно выводу в конце раздела 4.6, автор принял решение использовать в вихререзающих расчетах противопоточные аппроксимации для конвективных членов. По опыту Лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением ЦАГИ, применение противопоточных схем приводит к порче спектра турбулентности и потере равновесного интервала. Это может быть одной из основных причин, по которой IDDES-расчеты основной задачи (эксперимент Бэрроуза и Куркова) дали худшие результаты, чем RANS-расчеты.

Нет никакого сомнения, что Р.С.Соломатин, как создатель собственной программы, реализующей разработанную им самим математическую модель, способен в своей дальнейшей работе учесть эти замечания. Поэтому они не снижают ценности диссертации Р.С.Соломатина как работы, демонстрирующей высокую квалификацию автора по заявленной специальности. В диссертации впервые продемонстрирован работающий IDDES-метод для течений с неравновесным горением, основанный на гибридной явно-неявной схеме Меньшова-Накамуры, дано его сопоставление с методом IDDES на основе модифицированной гибридной схемы Кранка-Николсона и показана область эффективного использования безматричной реализации алгоритма LU-SGS для решения алгебраических уравнений неявной схемы. Впервые метод IDDES применен к моделированию классического эксперимента Бэрроуза и Куркова и сопоставлен с методом RANS в рамках одной программы и единого численного метода. Практическое значение работы определяется созданием верифицированной и валидированной собственной программы, которая может быть использована для моделирования турбулентных течений с горением.

8 ноября 2022 г. в Лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением НИО-1 ЦАГИ состоялся семинар Соломатина Р.С., посвященный его диссертационной работе. На семинаре присутствовал ведущий ученый, проф. В.А.Сабельников, другие сотрудники Лаборатории, специалисты Отдела вычислительной аэродинамики НИО-1 ЦАГИ, а также представители ЦИАМ и ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. Работа автора получила положительную оценку, ему был высказан ряд рекомендаций.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №335 от 21 апреля 2016 года. Автор диссертации Соломатин Роман Сергеевич достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, доцент,
заместитель начальника Лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением (Лаборатория №14)
Отделения аэродинамики силовых установок
Федерального автономного учреждения
«Центральный аэрогидродинамический институт имени проф.Н. Е. Жуковского»



В.В. Власенко

Подпись В.В. Власенко заверяю:

Ученый секретарь

Диссертационного совета

31.1.006.01 (Д 403.004.01) ЦАГИ

доктор физико-математических наук, доцент

«21» ноября 2022 г.



М.А.Брутян

Адрес: 140180, Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

Тел.: +7(495) 556-43-03

E-mail: info@tsagi.ru