

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бахнэ Сергея «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке методом IDDES», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Бахнэ С. посвящена актуальной проблеме горения водорода в высокоскоростном воздушном потоке. Инструментом исследования является математическое моделирование на основе одной из модификации метода крупных вихрей (LES), получившей название «улучшенный затянутый метод отсоединенных вихрей» (IDDES). Вихреразрешающий подход к моделированию турбулентности, к которому принадлежит названный метод, в настоящее время широко используются для решения различных физических задач, в том числе внутренних задач с горением. Однако, как и любого нового и достаточно сложного метода, необходима настройка параметров и тщательный выбор физических подмоделей, таких как подсеточная модель турбулентности, модель шероховатости стенки, тепловые граничные условия и т.д., а также численных методик, используемых для решения.

Именно этим вопросам посвящена диссертация, в которой перечисленные выше задачи рассмотрены в деталях и на хорошем методическом уровне. Среди достоинств работы отметим большой объем расчетных исследований нескольких аэродинамических течений, выполненных как на основе традиционного RANS-подхода, так и с применением LES-подобных методик. Диссертант провел детальное исследование влияния численной схемы на результаты моделирования задач о вырождении изотропной турбулентности, смешения неограниченных противоположно направленных потоков, взаимодействия падающего скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем, а также смешении воздуха и водорода при инжекции водородной струи в поперечный сверхзвуковой воздушный поток. На основании полученных результатов выбрана оптимальная численная схема, которая используется в дальнейших расчетах с горением.

Заключительная глава диссертации полностью посвящена моделированию реагирующих течений, выполненного в условиях экспериментов ONERA. Рассмотрено горение предварительно перемешанной водородно-воздушной смеси в канале при высоких входных скоростях. Для этой задачи подробно изучено влияние на режимы горения модели шероховатости и температурных условий на стенках канала, а также размеров отрывов в углах канала и уровня турбулентности во входном сечении. Показано, что существенное влияние на положение пиков в распределении давления на стенках канала оказывает высота шероховатости и температура стенок канала. В рамках модели IDDES получен наблюдаемый экспериментально режим с частичным запиранием канала и периодическим движением волны горения вверх и вниз по потоку.

Замечания:

1. Автореферат трудно читать, его текст плохо структурирован, содержит стилистические неточности, неудачные фразы, повторы и ошибки форматирования, например:
 - «..рассматриваемое течение можно смоделировать с помощью сжимаемых уравнений ..., которая достаточно широко представлена....» (с 5);
 - «...обзор по различным способам стабилизации горения» (с. 5);
 - «Расчеты проводятся до момента времени..., за который при заданных начальных условиях успевает развиваться...» (с. 11);
 - один и тот же текст «В качестве аппроксимации по времени ...» повторен на с. 9 и 10;
 - «... использовались результаты расчета..., доведенного до стационарного состояния» (с. 21).
2. Во введении отсутствуют ссылки на расчетные исследования, выполненные другими авторами для аналогичных задач.

3. На с. 7 и 8 приведены хорошо известные RANS уравнения движения однокомпонентной среды. В то же время уравнения движения многокомпонентной смеси и кинетические модели горения, на которых основаны принципиальные результаты работы, не приведены, как и детали предложенного автором граничного условия «инжектор» (с. 16) или процедуры калибровки констант подсеточной модели турбулентности (с. 11).
4. Отсутствует постановка и не приведены параметры сеток, используемых при решении тестовых задач, описанных в разделах 2.3 и 2.4.
5. Утверждение «в окрестности плоскости симметрии течение всюду сверхзвуковое» (с. 22) является спорным, поскольку на указанном рисунке присутствует звуковая линия.
6. Для иллюстрации картин реагирующего течения в разделе 3.8 автор приводит поля числа Маха, характеризующие газодинамическую структуру. При этом локальные или интегральные характеристики течения, описывающие процесс горения, такие как температура, концентрации химических компонентов, полнота сгорания водорода, не приводятся.

Отмеченные выше недостатки автореферата не снижают научную ценность и практическую значимость диссертации С. Бахнэ, которая является законченной научно-квалификационной работой, содержащей важные для развития моделирования высокоскоростных турбулентных реагирующих течений результаты.

Таким образом, диссертационная работа «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке методом IDDES» соответствует п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24/09/2013 г. с изменениями и дополнениями от 11/09/2021, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бахнэ Сергей, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Ведущий научный сотрудник ИТПМ СО РАН,
д.ф.-м.н., профессор

Н.Н. Федорова

Подпись Федоровой Н.Н. заверяю
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН,
к.ф.-м.н.



Ю.В. Кратова

Федорова Наталья Николаевна, доктор физико-математических наук по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы», профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории Волновых процессов в ультрадисперсных средах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,
Тел. +7(383) 330-42-68,
E-mail: nfed@itam.nsc.ru

Я, Федорова Наталья Николаевна, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Бахнэ Сергея, и их дальнейшую обработку.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бахнэ Сергея
«Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном
ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация посвящена численному моделированию неравновесных физико-химических процессов, связанных с горением водорода в каналах в присутствии сильных ударных волн и развитых отрывных областей течения.

Фундаментальная и практическая значимость исследований в данном направлении связана как с комплексностью возникающих явлений и сложностью построения валидируемых численных моделей, так и с важностью таких явлений при разработке технических устройств, таких как разнообразные силовые или газотурбинные установки. Несмотря на многолетние исследования многих научных групп, численное моделирование высокоскоростных течений с неравновесными физико-химическими превращениями остаётся трудоёмкой задачей, особенно при необходимости исследовать тонкую вихревую структуру течений с активным турбулентным перемешиванием. В этом смысле выбранное направление исследований является актуальным.

Текст диссертации Бахнэ С. можно охарактеризовать как научно-исследовательскую работу, обладающую единством по смыслу и изложению.

В главе 1 соискатель провёл подробный критический обзор существующих экспериментальных исследований высокоскоростных течений с учётом неравновесных физико-химических процессов, уделив особое внимание работам по стабилизации таких течений и успехам, достигнутым в численном моделировании наблюдаемых в эксперименте явлений. Как результат, основой для диссертационного исследования выбран эксперимент ONERA, в котором изучался способ стабилизации горения путём взаимодействия с ударными волнами и отрывными областями. Численное воспроизведение особенностей такого течения в численном моделировании является чрезвычайно сложной научно-технической задачей. Считаю, что обзор выполнен полно и, за исключением нескольких жаргонных фраз (например, "порядка десятка неплохих экспериментов"), в достаточной степени аккуратно и строго.

В главе 2 соискатель описывает решаемые дифференциальные уравнения метода отсоединённых вихрей и выбирает низкодиссипативную численную схему аппроксимации конвективного оператора. Выбор обосновывается решением ряда модельных задач, тестирующих базовые вычислительные свойства схем. Соискатель достаточно аккуратно верифицирует используемый численный метод. Верификация проводится на классической задаче о распаде изотропной турбулентности, в которой соискателем предложена процедура согласования начальных условий для полей физических и подсеточных параметров. Кроме этого, соискатель успешно сопоставляет свои численные результаты с известными экспериментальными данными для задачи о развитии слоя смешения между двумя потоками, распространяющимися навстречу друг другу. Верификацию выбранного численного метода завершает решение модельной задачи об отрывном взаимодействии турбулентного пограничного слоя с падающим на него скачком уплотнения. Замечу, что в постановке граничных условий для этой задачи на

верхней границе неожиданно появляется волна разрежения с конкретными геометрическими характеристиками, однако из автореферата или диссертации затруднительно визуализировать детали её первопричины и корректность её моделирования. По-видимому, такая постановка соответствует цитируемым работам (ссылки в диссертации: расчёт [189] и эксперимент [190]). Расширение рисунка 3 автореферата изображением воображаемого генератора скачка и центра веера волн разрежения помогло бы прояснить постановку задачи. Таким образом, соискателем выбран и аккуратно верифицирован численный метод исследований, применяемый в диссертации, что указывает на достаточную обоснованность полученных в главе 3 новых результатов.

Главная смысловая глава 3 посвящена численному исследованию одного экспериментального режима течения с горением водорода в расширяющемся канале. Соискатель подробно описывает эксперимент и обсуждает влияние неопределённости эксперимента на постановку численной задачи. Также даётся постановка расчётной задачи и обсуждаются результаты тестовых расчётов, в том числе, кратко обсуждаются результаты других авторов и место расчётов диссертации среди них. Расчёты проводятся в три этапа. Во-первых, исследуется роль различных параметров выбранной физико-математической модели, где показана важность учёта шероховатости поверхности. Во-вторых, соискатель оценивает неизвестную температуру стенок приближённым методом, фиксируя экспериментальное значение шероховатости стенок и подбирая температуру для наилучшего согласования расчётного положения пика давления с экспериментальным. В результате проведённых расчётов подобранная температура оказывается завышенной, её значение оценивается заново с помощью результатов расчёта и одномерной задачи для уравнения теплопроводности. Новая оценка, как указано в автореферате, согласуется со значением работы (Pelletier, et al., 2021). Однако остаётся неясным, почему соискатель не использовал результаты работы (Pelletier, et al., 2021) изначально и почему при этой температуре плохо согласуются расчётный и экспериментальный пики давления. В-третьих, проводится заключительный расчёт. В нём используется корректное значение температуры стенки, расширенная модель химической кинетики и модель турбулентности SST-NL, которая позволила корректно описать вторичное течение в углах канала и существенно улучшить согласование численных и экспериментальных результатов. Отмечу, что соискателю удалось дополнительно улучшить согласование с экспериментом путём подбора высоты шероховатости; доводы о правомерности такого подбора представляются убедительными. В результате соискатель смог сделать выводы о влиянии различных рассмотренных факторов на распределение давления в канале и на формирование центрального отрыва с горением. В заключение главы 3, на основе проведённых расчётов соискатель описал наблюдаемый механизм стабилизации горения в рассматриваемом течении, что, считаю, является главным результатом диссертации в области механики жидкости и газа.

Таким образом, при прочтении автореферата возникли следующие замечания (детали по замечаниям 1–3 приведены выше).

1. Имеются жаргонные фразы.
2. Постановку одной верификационной задачи следовало расширить для ясности.
3. Какова главная причина расхождения расчётного и экспериментального пиков давления после подбора температуры в расчётах главы 3?
4. В формуле в разделе 3.7, по-видимому, имеется опечатка (отсутствуют скобки).

Сделанные замечания не снижают научной значимости результатов, полученных соискателем, и не влияют на общую положительную оценку автореферата.

Вынесенные на защиту результаты являются новыми и обоснованными, хорошо апробированы и опубликованы в четырнадцать журнальных статьях в периодических изданиях, рекомендованных ВАК.

Автореферат диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9, в частности, задаче механики жидкости и газа и следующим областям исследования: 4) ламинарные и турбулентные течения; 5) течения сжимаемых сред и ударные волны; 9) физико-химическая гидромеханика; 12) пограничные слои, слои смещения, течения в следе; 19) численные методы исследования уравнений континуальных моделей однородных сред.

Заключение. Диссертационное исследование Бахнэ С. является законченной научно-квалификационной работой, в которой выявлен и описан механизм стабилизации горения в отрывном течении в канале в присутствии сильных ударных, что является важным вкладом в развитие современной аэротермодинамики химически реагирующих сред. Таким образом, диссертация удовлетворяет требованиям (в том числе п.9) «Положения о порядке присуждения учёных степеней» от 24.09.2013 №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Бахнэ Сергей, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости газа и плазмы.

Я, Чувахов Павел Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Главный программист-исследователь ООО «Аэросим»

Адрес: 140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Луч, д.24/1А, офис 3.1

Тел.: +7 (499) 540-46-36

E-mail: pavel_chuvahov@mail.ru

доктор физико-математических наук
(1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы)



(29.09.2025 г.)

Чувахов Павел Владимирович

ПОДПИСЬ ЧУВАХОВА П.В. И ДАННЫЕ ЗАВЕРЯЮ

Генеральный директор ООО «Аэросим»



С.З. Имаев

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бахнэ Сергея на тему «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9 - «Механика жидкости, газа и плазмы»

С представленным авторефератом диссертации Бахнэ Сергея ознакомился. Работа посвящена крайне актуальной и сложной проблеме численного моделирования турбулентного горения в высокоскоростных потоках, что имеет важное прикладное значение для развития перспективных энергетических установок.

Общая оценка работы является исключительно положительной. Автор проделал масштабную и комплексную исследовательскую работу, продемонстрировав глубокое понимание физики процессов и владение современными методами вычислительной гидродинамики. Можно выделить ряд несомненных достоинств работы:

1. **Научная новизна и значимость.** В работе предложены оригинальные и практически значимые разработки: методика согласования начальных полей для вихреразрешающих расчетов, модификация граничного условия для шероховатых стенок, а также, что наиболее важно, – впервые выявлен и описан механизм стабилизации высокоскоростного горения в расширяющемся канале на основе IDDES-моделирования.
2. **Комплексный методологический подход.** Проведен тщательный анализ и обоснованный выбор численных схем (гибридная WENO5+CD2) и методов временной дискретизации (Heun3), что подкреплено результатами тестирования на канонических задачах (распад изотропной турбулентности, слой смешения). Это обеспечивает достоверность и воспроизводимость основных результатов.
3. **Систематическое исследование влияния физических факторов.** Автор последовательно, в трех сериях расчетов, исследует влияние таких ключевых факторов, как шероховатость стенок, температура стенок, вторичные течения, уровень турбулентности на входе, что позволяет количественно оценить их вклад в структуру течения и распределение давления.
4. **Практическая ценность.** Разработанные и откалиброванные методики реализованы в программном модуле zFlare и уже применяются в ЦАГИ для решения практических задач, что подчеркивает прикладную направленность работы.
5. **Апробация и публикационная активность.** Результаты работы прошли широкую апробацию на многочисленных авторитетных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в международные базы данных (Scopus, WoS) и ВАК, что свидетельствует о признании научным сообществом.

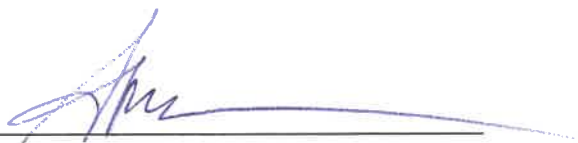
Вместе с тем, в рамках научной дискуссии, можно высказать следующие замечания и пожелания, которые не снижают общей высокой оценки работы:

1. Количественный анализ влияния физических факторов (Таблица 1) является большим достоинством работы. Однако критерий «Отрывная область с горением» оценен качественно («сильно/слабо влияет»). Было бы полезно уточнить, **предпринимались ли попытки дать более формализованную, количественную оценку изменению структуры отрыва** (например, через изменение длины зоны рециркуляции или ее объема).
2. В работе обоснованно выбран эксперимент ONERA как база для валидации. В то же время, упоминается, что в ЦАГИ в 2018-2021 гг. был организован подобный эксперимент. **Краткий комментарий о том, планируется ли в будущем использование данных отечественного эксперимента для дополнительной валидации модели**, был бы полезен с точки зрения перспектив развития исследований.

Высказанные замечания носят частный характер и не умаляют значимости полученных результатов, а лишь указывают на возможные направления для дальнейших исследований.

На основании изложенного считаю, что диссертация выполнена на высоком уровне и представляет собой завершенное научное исследование, а ее автор, Бахнэ Сергей, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - «Механика жидкости, газа и плазмы»

Молчанов Александр Михайлович



д.т.н., профессор, профессор кафедры 204 МАИ

+7 915 404 5710, e-mail: molchanovam@mai.ru

Подпись Молчанова А.М. подтверждаю



Ученому секретарю
диссертационного совета 31.1.006.01
на базе ФАУ «ЦАГИ»,
доктору физико-математических наук,
доценту Брутяну М.А.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бахнэ Сергея на тему «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Бахнэ С. посвящена численному исследованию поперечной инжекции водорода в высокоскоростной горячий поток воздуха в прямоугольном канале. В работе предложена оригинальная модификация вихреразрешающего численного метода, с помощью которого осуществляются основные расчеты. Модифицированный метод протестирован на ряде задач, включая как свободное дозвуковое турбулентное течение, так и взаимодействие ударных волн с пограничным слоем. Для задач в канале с горением модифицировано и протестировано граничное условие шероховатой стенки, а также условие «инжектор», позволяющее не выделять отверстие инжекции сеточными линиями. Для основной задачи проведены три серии RANS-LES расчетов, в первой из которых установлено, что с точки зрения продольного распределения давления (наиболее часто получаемое в эксперименте измерение) ключевой вклад вносят уровень шероховатости и температура стенок. Во второй серии было подобрано значение температуры стенок (в виду отсутствия этого параметра в экспериментальных данных), обеспечивающее правильное положение и амплитуду пика давления за инжектируемой струей в рамках RANS-расчетов. В IDDES-расчете с этим значением температуры автор получил механизм стабилизации горения, схожий с наблюдаемым в эксперименте. В третьей серии С. Бахнэ рассмотрел влияние различных физических факторов на продольное распределение давления и форму центрального отрыва за инжектируемой струей. Подтверждено существенное влияние, как правило, игнорируемых при моделировании вторичных токов на структуру течения и режим горения через взаимодействие с центральным отрывом. Представленные численные результаты могут быть полезны при моделировании высокоскоростных камер сгорания: в случае расхождения экспериментальных

данных и результатов расчетов становится ясным, как повлияет учет какого-либо из рассмотренных физических факторов.

К автореферату можно сделать следующие замечания:

1. В тексте автореферата отсутствует изображение сеточных линий основной задачи. Поэтому невозможно понять, насколько хорошо разрешена инжектируемая струя.

2. В автореферате ничего не сказано о модели взаимодействия турбулентности и горения, что является крайне важным в рассмотренной задаче.

В целом, несмотря на отмеченные недостатки, представленная диссертация Бахнэ Сергея представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу и соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842 (ред. от 25.01.2024)), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Бахнэ Сергей, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Ведущий научный сотрудник 112 лаборатории газодинамики взрыва
и реагирующих систем, д.ф.-м.н., с.н.с.,

16.09.2025  Марков Владимир Васильевич

Адрес: НИИ механики МГУ, 119192, г. Москва, Мичуринский просп., д. 1

тел.: +7-915-187-50-22

e-mail: markov@mi-ras.ru



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации

Бахнэ Сергея

«Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9 – Механика жидкости газа и плазмы

Диссертация Бахнэ С. посвящена актуальной задаче по разработке физико-математической и вычислительной моделей для проведения предсказательного моделирования газодинамических и химических процессов в высокоскоростных многокомпонентных газовых потоках с применением современных вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности (в частности, гибридного подхода IDDES). Задача имеет высокую научную и практическую значимость, так как решение проблемы горения в высокоскоростных газовых потоках необходимо при разработке и оптимизации работы энергетических устройств (силовых установок различных типов, газотурбинных установок, используемых в тепловых электростанциях, компрессорных станциях, в морском и железнодорожном транспорте). Аналитическое описание турбулентных течений при этом возможно в очень ограниченном спектре условий, а проведение экспериментальных исследований часто является чрезвычайно трудоемким и экономически затратным, что делает моделирование важнейшим инструментом научных исследований и инженерного проектирования. Использование гибридных подходов является оптимальным решением на сегодняшний день, так как модели, основанные на решении осредненных уравнений Навье-Стокса (RANS), на текущий момент не всегда способны представить исследователю весь спектр информации с необходимой точностью, а прямое численное моделирование (DNS) все еще остается чрезвычайно вычислительно затратным.

В работе автором была предложена оригинальная процедура согласования начальных полей параметров подсеточной модели турбулентности с начальным полем скорости. На решении задачи о распаде изотропной турбулентности с применением различных численных методов было показано, что без этой процедуры поле подсеточных параметров не успевает подстроиться под поле течения, что приводит к некорректному виду турбулентных энергетических спектров. В процессе анализа, получаемых при моделировании данной задачи, энергетических спектров автором впервые применительно к выбранному в диссертации вихреразрешающему численному методу выполнена калибровка констант метода LES.

Автором было выполнено численное исследование задач о формировании нестационарного дозвукового слоя смешения между двумя воздушными потоками, а также об отрыве турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковом потоке под воздействием скачка уплотнения с применением вихреразрешающего подхода. Основной целью масштабного исследования трех задач был подбор численной схемы, обладающей оптимальными диссипативными свойствами для проведения трехмерного моделирования реагирующих течений. Результатом исследования стал выбор гибридной схемы WENO5-CD2.

В качестве основной задачи диссертации С. Бахнэ было выбрано моделирование одного из экспериментов ONERA, представляющего модельную прямоточную камеру сгорания прямоугольного сечения с расширением по высоте. Автором было проведено три серии RANS и LES расчетов, нацеленных на выявление влияния различных параметров на точность решения и воспроизведение эффектов, описанных в эксперименте. Также была рассмотрена зависимость от используемого кинетического механизма на примере двух механизмов Jachimowski.

На основе проведенных расчетов и полученных картин течения по времени и пространству автором описывается механизм стабилизации горения в камере сгорания, основанный на взаимодействии пограничного слоя, скачков уплотнения и зоны горения, однако отмечается, что данный механизм может быть обусловлен используемой физико-математической моделью, а также указывается на разный механизм стабилизации в RANS и IDDES расчетах при идентичности остальных параметров модели.

При моделировании шероховатых стенок автор использовал оригинальную модификацию граничного условия. Также новаторским является сам анализ влияния определяющих факторов и механизм стабилизации горения в сверхзвуковом потоке для рассматриваемой задачи.

Вместе с тем, по работе можно сделать несколько замечаний:

- Среди пунктов, описывающих научную новизну работы указана процедура согласования начальных полей параметров подсеточной модели турбулентности с начальным полем скорости, однако в тексте автореферата лишь вскользь указано, что она необходима для правильного моделирования энергетического спектра турбулентности, но даже в общем не указано, в чем она состоит.
- Несмотря на то, что «Моделирование горения» вынесено в заголовок работы, в описании модели (раздел 2.1) и численных методов (раздел 2.2.), к сожалению, не приводится никакой информации о моделировании химических реакций, используемых численных методах интегрирования системы ОДУ химической кинетики, которая в случае использования детальных механизмов является жесткой, а также о

- взаимодействии газодинамического и химических блоков (используется ли расщепление по процессам или нет?).
- В представленной в разделе 2.1 системе отсутствуют члены, связанные с диффузионными потоками массы и энергии, хотя присутствуют слова «...молекулярная диффузия описывается линейной моделью...». Или система записана для однокомпонентного газа?
 - Является ли теплоемкость одинаковой для всех компонент смеси и независимой от температуры, если говорить о горении с применением детального механизма? Если нет, то формула для энтальпии $h = C_p T$ является слишком грубой аппроксимацией.
 - Для формулы Сазерленда также приведены фиксированные параметры. Чему они соответствуют? Считается ли вязкость смеси по формуле с данными коэффициентами или через вязкость компонент?
 - Рассматриваемые схемы аппроксимации по пространству имеют достаточно широкие шаблоны, для которых необходимо известное позиционирование расчетных ячеек относительно друг друга. Означает ли это, что используемый программный комплекс предназначен для проведения расчетов только на структурированных сетках?
 - Использование таких словосочетаний как «... «полочка» давления...», несмотря на широкое применение в повседневной работе, не совсем уместно при написании монографий.

Указанные замечания не снижают актуальности, научной ценности и практической значимости работы. В целом анализ автореферата свидетельствует о том, что диссертационная работа Бахнэ С. является законченным научным исследованием, содержит новые научные результаты, заслуживает положительной оценки и соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям, а ее автор Бахнэ С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости газа и плазмы.

Заведующий ОВМ,

ведущий научный сотрудник,

НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ

к.ф.-м.н.



Семенов И.В.

Старший научный сотрудник,

НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ

к.ф.-м.н.



Соломатин Р.С.

Подпись Семенова И.В. и Соломатина Р.С. удостоверяю:



Начальник отдела кадров
НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ

Полех Ж.А.

Семенов Илья Витальевич, Соломатин Роман Сергеевич

117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1.

Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный
научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Раб.тел.: +7(495)718-21-10 доб. 1814

Адрес электронной почты: ivsemenov@niisi.ras.ru, solomatin@niisi.ras.ru

8 октября 2025 г