

ОТЗЫВ

**официального оппонента Емельянова Владислава Николаевича
на диссертацию Черновой Алены Алексеевны
«Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных
пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере
сгорания энергетических установок», представленную на соискание
ученой степени доктора технических наук по специальности
1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы**

В шестидесятые годы прошлого века возрос интерес к задачам внутренней газодинамики энергоустановок, а именно, к газодинамическим и тепловым процессам в появившихся в это время крупногабаритных твердотопливных двигателях. Было оформлено научное направление ориентированное на экспериментальное и математическое исследование всей совокупности газодинамических, тепломассообменных и напряженно-деформационных процессов.

Заряд твердотопливного двигателя имеет весьма сложную геометрическую форму поверхности горения твердого топлива. Это отражается на весьма сложной газодинамической структуре внутреннего течения, приводящей к появлению локализованных зон с повышенным силовым, тепловым, эрозионным воздействием на рабочие поверхности двигателя.

Изучить структуру течений такого рода в то время можно было только экспериментально на модельных установках, в которых течение воспроизводилось с использованием холодного воздуха, подаваемого в установку через имитаторы горящих поверхностей. Такие установки были созданы в НИИ-88, НИИТЦ, ИТГИМ и ВОЕНМЕХе.

Представления о структуре течения, кроме поточных и дренажных измерений, давали саже-масленные картины поверхностных линий тока.

Тогда же была установлена связь особых точек и линий стекания–растекания с особенностями теплового нагружения конструкции. На установках такого типа можно было выявить общие особенности, но использовать этот подход для задач оптимизации проектных параметров энергоустановки было невозможно из-за трудностей геометрического и газодинамического моделирования меняющихся в процессе проектирования форм объектов.

Построить расчетные методики пространственного моделирования внутренних вязких течений в то время, да и достаточно долго в последствии, не представлялось возможным.

В представленной диссертационной работе Черновой А.А. задачи внутренней газодинамики приповерхностных газодинамических структур и связанных с ними локализованных зон повышенного теплового воздействия, решаются на основе использования современных вычислительных технологий.

Развитие в этом направлении средств цифрового моделирования весьма значимо и востребовано при разработке систем нового поколения.

Актуальность избранной темы

В диссертационной работе Черновой А.А. дан обширный аналитический обзор экспериментальных и теоретических работ по всей совокупности процессов – газодинамических, физических, тепломассообменных, протекающих в камерах сгорания энергоустановок различного класса. На основе этого обзора выявлены основные проблемные вопросы, определяющие условия работоспособности изделий, выявлены ситуации, представляющие определенные проблемы, даны оценки перспектив развития нового поколения установок и потребных для этого средств научной поддержки.

Объектом исследования определена камера сгорания энергоустановки, в качестве основного объекта избрана камера сгорания современного крупногабаритного двигателя на твердом топливе, весьма сложном в

геометрическом плане и по совокупности протекающих в этом объекте процессов. Предметом исследования являются газодинамические и тепломассообменные процессы, протекающие в условиях сложной пространственной организации проточной части камеры, турбулентного характера течения и появления зон повышенного теплового воздействия на внутренние поверхности. Тема работы определена как исследование задач внутренней газодинамики как объекта в целом, так и локальных пространственно-временных зон с повышенным тепловым воздействием на внутренние поверхности.

На современном этапе создания энергоустановок нового поколения происходит модификация конструктивных решений, применяются новые материалы и энергокомпоненты. Для обеспечения задач по проектированию и доводочным работам требуется научная поддержка, обеспеченная цифровыми технологиями оптимизации проектных параметров. Тема диссертационной работы в полной мере отвечает этим задачам, что определяет её несомненную актуальность.

Целью работы поставлено формирование подхода, основанного на средствах вычислительного моделирования, газодинамических и теплообменных процессов и выявление зон локализованного теплового воздействия в камере сгорания энергоустановки.

Поставлены четко сформулированные задачи, в числе которых разработка математических моделей, многовариантное моделирование процессов внутренней газодинамики и теплопереноса, численное моделирование нестационарных процессов в областях с подвижными массоподающими границами, выявление зон особой газодинамической структуры, приводящих к развитию особых приповерхностных эффектов, проявляющихся в топологических картинах поверхностных (предельных) линий тока, с установлением связи с этими картинами зон повышенного теплообмена. Особо отметим в числе поставленных задач разработку

программного комплекса, проводящего оценку тепловой нагрузки объекта.

Анализ материалов диссертационной работы и публикаций автора, позволяют сделать вывод, что поставленные задачи решены и поставленные цели исследования достигнуты.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

При проведении исследований автор использует математические модели, в которых имеются определенные ограничения. Эти ограничения упрощают проведение исследований, но требуют должного обоснования.

Рабочее тело в двигателях на твердом топливе является двухфазной средой. Высокая весовая концентрация частиц обусловлена использованием для поднятия энергетики присадок металла, оксиды которого дают конденсированные частицы. Объемная доля конденсата мала, существенного влияния на газодинамические параметры он в камере сгорания не производит, его влияние становится ощутимым в сопловой части течения. В камере может присутствовать инерционный вынос частиц на стенки, но этот фактор может быть учтен проведением дополнительного фрагментарного моделирования. Отсутствующий в используемой модели лучистый теплообмен в камере, где температура газа практически однородна, заметного влияния на газодинамику не дает, а вклад в тепловой поток в стенку, имеющую меньшую температуру, может быть оценен дополнительным фактором по инженерным подходам.

В силу этого принятую математическую модель следует признать вполне приемлемой для получения на её основе обоснованных научных положений, выводов, и результатов.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов также не вызывает сомнения. Тщательно анализируются все аспекты постановки задачи для её численного решения, проводится анализ проблем сходимости. При построении предельных линий тока,

устанавливаемых как векторное поле поверхностного вязкого напряжения, используются отвечающие хорошему описанию приповерхностных эффектов модели турбулентности, а градиент скорости на стенке устанавливается из зоны весьма малых значений y^+ — координаты пристеночного сдвигового течения.

Используемые средства моделирования прошли подробную верификацию на экспериментальных данных и теоретических результатах, полученных другими авторами.

Научная новизна диссертационного исследования

Анализ результатов исследования даёт основание сделать вывод об их несомненной научной новизне. Сюда следует отнести выявление на основе численного анализа локальных зон, в которых проявляются повышения тепловых потоков и установление их изменения в процессе работы двигателя; выявление связи газодинамической особенности зоны с картиной предельных линий тока на стенке; установление критериальных соотношений теплообмена для зон с особой топологией предельных линий тока; получение на основе численного эксперимента на нестационарных режимах зависимости изменения коэффициента теплоотдачи в особых зонах поверхности камеры. Несомненную новизну имеет подход построения программной среды для интерактивной работы с базой накопленных данных вычислительного моделирования.

Значимость результатов исследования для практики

Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании камер сгорания двигателей нового поколения, в которых новые конструктивные решения могут привести к появлению газодинамических структур с зонами повышенного теплового воздействия. Можно рекомендовать на начальных этапах проектирования проведения освидетельствования конструкции по предложенным в работе подходам.

Возможно также использование газодинамических процессов с формированием описанных в работе зон для управляемого теплового воздействия на поверхность в различных технологиях формирования материалов с особыми свойствами.

Замечания по работе сводятся к следующим.

1. В последнее время стал развиваться интерес к использованию вихреразрешающих подходов для анализа внутрикамерных пространственных течений. Такие подходы, как правило, имеют дополнительный потенциал для разрешения вихревых структур различных масштабов, что актуально для рассматриваемых автором нестационарных процессов вблизи сопловой крышки. Имеются ли у автора опыт использования этого подхода для задач рассматриваемого класса?
2. Среди представленных в работе дифференциальных моделей турбулентности, основанных на подходе осреднения по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса не рассмотрены модели из семейства моделей Рейнольдсовых напряжений, которые позволяют определить напрямую все компоненты тензора турбулентных напряжений. Это, в частности, даёт возможность учесть и разрешить эффекты анизотропии турбулентности, что было бы желательно для рассматриваемого класса течений с явно выраженной пространственной закруткой потока.
3. Полученные вычислительным моделированием так называемые «предельные линии тока» дают яркую картину топологических структур на внутренних поверхностях энергоустановок. Для особых точек и линий этой картины выявлены особенности теплового нагружения конструкции. Поверхностная картина является следствием газодинамической структуры пристеночной области течения. Но иногда может появиться и обратная задача. Например, в эксперименте получен визуализационный спектр поверхностных линий тока. Интерес

представляет задача реконструкции газодинамического течения, создающего полученную картину предельных линий тока. Разработки в этом направлении дали бы возможность создания методов газодинамического управления тепловым нагружением, что представляет интерес для ряда новых технологий. Имеется ли у автора опыт в этом направлении? .

4. Хотя задачи двухфазной газодинамики не рассматриваются в данной работе, мне представляется, что можно было бы рассмотреть поведение частиц в областях с поверхностными особенностями и оценить возможность инерционного выноса конденсированной фазы на стенку в области поверхностных особенностей картины предельных линий тока.
5. В материалах работы отсутствуют сведения по газодинамическим картинам обтекания и образования поверхностных спектров предельных линий тока для поворотного утопленного сопла. Анализ работ соискателя показывает, что исследования в этом направлении проводились.
6. Следовало бы более подробно описать использованный подход обработки вычислительных данных при получении критериальных зависимостей, дать сведения об использованной базе данных. Описать особенности выбора определяющих параметров (в числах Рейнольдса и Нуссельта) для вариантов геометрии, когда скорость и характерный размер могут быть определены неоднозначно.
7. Коэффициент теплоотдачи определяется из полученного из решения сопряженной задачи, в которой уравнение теплопроводности тела несет в себе теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость) заданного материала. Насколько полученные из этой задачи данные о коэффициенте теплоотдачи будут применимы для других материалов. Вопрос этот дискуссионный. Можно привести

следующий взгляд на эту задачу. Ньютоновское представление теплового потока в стенку предполагает, что поток определяется перепадом температур, а коэффициент теплоотдачи устанавливает газодинамические аспекты и слабо зависящие от температуры, а учет такого влияния устанавливается введением зависимости от температурного фактора. Мне представляется, что коэффициент теплоотдачи с определенной точностью можно устанавливать решая не сопряженную задачу, а задачу с граничными условиями в виде разумно выбранной постоянной температурой стенки. Положение это, конечно, требует проверки, но если подтвердится его обоснованность, это существенно упростит объем вычислительного эксперимента для создания базы данных о тепловом нагружении в типовых конструктивных решениях энергоустановок данного класса. Вопрос этот я предлагаю обсудить на дискуссии.

Приведенные замечания носят, скорее, дискуссионный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертация написана ясно и четко. Видно, что представленные материалы основаны на глубоком и обширном авторском исследовании, они подробно обсуждены, по ним делаются обоснованные и значимые выводы. Материалы и стиль изложения, использованные модели и подходы, сформулированные выводы и обобщения говорят о глубокой эрудиции и высокой квалификации автора. Чернова Алена Алексеевна является известным специалистом в области внутренней газодинамики энергоустановок.

Анализ публикаций автора позволяет сделать заключение о том, что основные результаты её исследования в полной мере опубликованы в рецензируемых изданиях. Количество публикаций отвечает требованиям, установленным разделом II «Положения о присуждении ученых степеней», в

отношении диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. Ссылки автора имеют указания на источник заимствования. Работы, выполненные в соавторстве, в должной степени отмечены.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования полностью отвечает областям исследований 4, 5, 12, 14 паспорта специальности ВАК 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы. Приведенные в диссертации оригинальные результаты исследований отвечают областям, определенным содержанием специальности, что полностью отвечает требованиям формулы специальности. В диссертационной работе в качестве аппарата исследований при получении новых моделей, вычислительных методов и алгоритмов четко выражена нацеленность на решение технических задач, что полностью подтверждает заявленную в работе отрасль науки – технические науки.


Делая общее заключение, отметим, что работа выполнена на актуальную тему, научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации в должной степени обоснованы, их достоверность подтверждена тестовыми исследованиями, сравнительными проработками. Работа имеет высокий уровень новизны.

Диссертация Черновой А.А. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные решения проблемы идентификации локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие цифровых технологий при разработке объектов новой техники.

Работа Черновой А.А. подробно обсуждалась на научном семинаре БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и получила положительную оценку.

Работа Черновой Алены Алексеевны «Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок» полностью отвечает требованиям к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, определяемым пунктом 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 20 марта 2021 г. № 426 и другим критериям, установленным в разделе II этого Положения. Автор диссертации Чернова Алена Алексеевна достойна присуждения ей искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

д.т.н., профессор


24.05.2022

В.Н. Емельянов

Емельянов Владислав Николаевич, доктор технических наук (специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы), профессор.

Профессор кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1
тел.: 8 (921) 9939096, E-mail:ve5303@mail.ru, emelianov_vn@voenmeh.ru

Подпись и приведенные данные удостоверяю

Ученый секретарь Ученого Совета

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова



М.Н. Охочинский