

УТВЕРЖДАЮ

Научный руководитель -
заместитель генерального директора
Федерального государственного
унитарного предприятия



«Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова»

д.т.н., с.н.с. А.И. Ланшин

«21» 04 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Яковенко Ивана Сергеевича

«РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗАХ И
ГАЗОВЗВЕСЯХ»,

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Диссертация посвящена исследованию режимов распространения волн горения и формирования детонационных волн с помощью методов математического моделирования нестационарных двумерных и трехмерных течений водородно-кислородной смеси, с применением детальных моделей химической кинетики для описания процесса горения. Численный метод, а также программный комплекс были специально адаптированы для расчетов на современных суперкомпьютерных системах. При этом используются математическая модель нестационарного течения, основанная на системе уравнений Навье-Стокса для многокомпонентной реагирующей смеси газов, апробированные базы данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ и методы вычисления коэффициентов переноса. Некоторые задачи решались с учетом влияния дисперсной фазы и излучения. В результате автору удалось получить ряд новых научных результатов и

провести их анализ. При этом особый интерес вызывают результаты расчетов трехмерных нестационарных течений с применением детальной химической кинетики для водородно-кислородной смеси и расчетных сеток, позволяющих разрешать масштабы химических реакций при развитии и распространении фронта пламени, образование волн сжатия и их взаимодействие с фронтом пламени, приводящее к ускорению пламени и переходу к детонации.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация представлена на 135 страницах, список цитируемых источников содержит 151 работу.

Во введении формулируются цели и задачи диссертации, основные положения, выносимые на защиту, с учетом актуальности работы, её научной новизны и практической ценности. Во введении представлен также список основных публикаций автора по теме диссертации и отмечен его личный вклад.

В первой главе диссертации дан краткий исторический обзор исследований по горению и взрыву. Кроме того, проведен анализ основных работ, как классических, так и современных, опубликованных в 2015 - 2016 гг., по нестационарным и переходным режимам горения. Кроме того, в этой же главе формулируются основные положения используемых в диссертации моделей для описания трехмерного течения реагирующей среды, а также учета дисперсной фазы и теплового излучения, дается информация об используемых редуцированном и детальном реакционных механизмах для окисления водорода.

Вторая глава посвящена особенностям применения используемых в исследованиях численного метода и программного комплекса, ориентированных на проведение расчетов для задач, характеризующихся достаточно обширным набором моделей для описания сложных физико-химических процессов, на современных суперкомпьютерных системах.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследований по ускорению пламени и переходу к детонации, полученные в трехмерной постановке с детальным анализом протекающих физико-химических и газодинамических процессов. При этом используются специальные методы для интерпретации полученных результатов. Проводится сопоставительный анализ основных стадий процесса, предсказываемых на основе двумерных и трехмерных расчетов и отмечается их качественное соответствие. В этой же

главе рассматривается задача о развитии волн горения в замкнутых объемах, заполненных бедной водородно-воздушной смесью, с учетом гравитационных сил. Изучается структура всплывающего в гравитационном поле очага горения.

В четвертой главе диссертации излагаются результаты исследований процессов формирования и распространения волн горения и детонации в области, заполненной дисперсной средой инертных микрочастиц, которые нагреваются излучением. В этой же главе с использованием методов математического моделирования исследуется возможность нанесения микрочастиц на твердотельную подложку с помощью детонационной волны.

Пятая глава посвящена исследованию возможностей нового численного метода (КАБАРЕ), предложенного ранее и хорошо себя зарекомендовавшего при решении задач газовой динамики. В диссертации этот метод распространен на случай реагирующей смеси газов. Представлены примеры расчетов для модельных задач, свидетельствующие об эффективности развиваемого метода.

В заключении сформулированы главные результаты работы.

Актуальность темы диссертации. Как отмечается в обзоре литературы, представленном в первой главе диссертации, в физике горения и взрыва одной из наиболее актуальных проблем до настоящего времени остается изучение нестационарных режимов распространения волн горения и перехода от дефлаграции к детонации. Многолетняя история этих исследований, которая отражена в обзоре, включает как теоретические, так и экспериментальные работы. Следует отметить, что с момента появления методов вычислительной газовой динамики задачи моделирования формирования и распространения детонационных волн, находились в центре внимания научного сообщества. При этом, из-за сложности и взаимного влияния протекающих газодинамических и физико-химических процессов задача рассматривалась, как правило, в упрощенной постановке. До недавнего времени для случая заранее перемешанной реагирующей смеси эти задачи решались, в основном, в рамках системы уравнений Эйлера. Для моделирования процессов горения на первом этапе применялись так называемые двухстадийные модели кинетики (они использовались вплоть до конца 90-ых годов и даже в начале 2000-ых, в частности, при моделировании ячеистой структуры детонации). Для описания кинетики окисления водорода были разработаны

редуцированные реакционные механизмы, ориентированные на высокотемпературный механизм воспламенения (с учетом повышения температуры за лидирующей ударной волной). В настоящее время с появлением высокопроизводительных вычислительных комплексов, появился ряд расчетных работ с моделированием двумерных и трехмерных задач в рамках системы уравнений Эйлера с привлечением детальных реакционных механизмов для описания кинетики окисления водорода.

Задача математического моделирования процесса перехода от дефлаграции к детонации в гомогенной топливно-воздушной смеси (даже для простейшего варианта водородно-кислородной смеси), по-прежнему, является актуальной. Как отмечается в диссертации, для решения этой задачи необходимо привлекать уравнения Навье-Стокса для многокомпонентной реагирующей смеси, детальный реакционный механизм для описания химических процессов, расчетные сетки, которые позволяют с контролируемой точностью моделировать фронт пламени, длины зон индукции и протекания химических реакций при учете распространения продольных и поперечных волн сжатия, генерируемых на фронте пламени, сложную топологию фронта пламени, его динамику. Решение задач такого уровня сложности в двумерной, а тем более в трехмерной, постановке, с привлечением высокопроизводительных вычислительных систем, безусловно, делает тему диссертации актуальной. Актуальность работы обусловлена также важностью полученных результатов и разрабатываемых методов расчета, программных комплексов для практических применений в области обеспечения пожаро- взрывобезопасности и создания новых типов двигателей с использованием детонационного горения.

Научная новизна работы определяется следующими результатами, полученными в диссертации. Особо следует отметить, что интерпретация результатов расчета, полученных на высокопроизводительном вычислительном комплексе, для существенно нестационарных режимов горения потребовала больших усилий со стороны диссертанта и глубокого проникновения в существо изучаемых вопросов.

1. Безусловным достижением диссертации является разработка современных программных средств (глава 2), позволяющих провести расчеты на высокопроизводительном вычислительном комплексе для нестационарных задач горения в трехмерной постановке с возможностями использования

достаточно сложного набора моделей течения и физико-химических процессов (многокомпонентный состав, вязкость, теплопроводность, диффузия, химические реакции, наличие дисперсной фазы, излучение), а также различных численных методов для решения соответствующих систем уравнений. В настоящее время реализован эйлера-лагранжев метод (ЭЛМ) с расщеплением по физическим процессам. В результате удалось провести расчеты перехода от горения к детонации в полуоткрытом канале при инициировании детонации у закрытого конца в трехмерной постановке при использовании 25 млн. расчетных ячеек.

2. Наибольший интерес вызывают результаты, представленные в главе 3 (раздел 3.1) диссертации. В рамках математической модели на основе полной системы уравнений Навье-Стокса для многокомпонентной реагирующей водородно-кислородной смеси с привлечением детальной кинетической модели для описания окисления водорода и с учетом пограничного слоя на стенках канала квадратного поперечного сечения проведены расчеты процесса распространения фронта пламени с переходом к детонации при инициировании горения у закрытого конца. Предполагалось, что стенки канала являются адиабатическими. Инициирование горения в канале, заполненном однородной стехиометрической водородно-кислородной смесью при нормальных условиях, осуществляется у закрытого конца путем повышения температуры в тонком слое, прилегающем к стенке. При этом фактически проводится прямое численное моделирование течения на выбранной расчетной сетке с учетом требований к разрешению структуры фронта пламени. В диссертации на рисунке 3.3 представлены поля течения на различных стадиях ускорения пламени и перехода к детонации. Выделяются четыре характерных стадии в динамике процесса горения и перехода к детонации. Для анализа роли волн сжатия в развитии процесса горения применялась модель движущегося источника энерговыделения, в рамках которого фронт пламени представляется как совокупность источников конечного размера, каждый из которых генерирует волны сжатия, которые распространяются в разных направлениях. Оценивается роль волн сжатия при распространении фронта пламени на разных стадиях процесса ускорения пламени. Обращается внимание, что наличие пограничного слоя приводит к растяжению фронта пламени, а при искривлении поверхности фронта возникают поперечные волны сжатия. На стадии, непосредственно предшествующей возникновению детонации, ускорение пламени вызвано тем,

что при реализуемом давлении время индукции снижается при увеличении давления. Сравнение результатов двумерных и трехмерных расчетов свидетельствует о том, что имеет место качественное соответствие по основным стадиям ускорения фронта пламени и перехода к детонации.

Для обсуждаемой ситуации на заключительной стадии процесса перехода от дефлаграции к детонации определяющим фактором оказалось уменьшение времени индукции с ростом давления. Поэтому в подразделе диссертации 3.1.3 в двумерной постановке была рассмотрена модельная задача и проанализирована ситуация, когда условия в канале таковы, что на момент достижения пламенем скорости звука давление в зоне реакции достигает величины, при которой время индукции возрастает с увеличением давления. При этом процесс развивается с возникновением последовательных фаз ускорений и торможений фронта пламени, что в итоге сопровождается возникновением комплекса, состоящего из ведущей ударной волны и фронта реакции, следующего на некотором расстоянии за ударной волной. На основании анализа полученных результатов была предложена концепция перехода к детонации в этом случае, связанная с возникновением нового очага самовоспламенения в непосредственной близости или на некотором расстоянии от «старого» фронта пламени, с формированием новой волны горения. Новая волна горения либо трансформируется в детонационную волну, либо детонационная волна формируется в результате взаимодействия новой волны горения с ведущей ударной волной.

3. В разделе 3.2 детально исследован процесс развития горения бедных водородно-воздушных смесей в замкнутом объеме. Процесс горения инициируется локализованным источником энергии. Интерес к этой проблеме обусловлен вопросами пожаро- и взрывобезопасности. Численное моделирование проводится в рамках двумерной постановки задачи для объема, имеющего цилиндрическую форму. Инициирование горения осуществляется вблизи нижнего торца цилиндра в соответствии с результатами имеющихся экспериментальных исследований. В рассмотренной задаче концентрация водорода по объему составляет 6%, что в соответствии с экспериментальными данными обеспечивает устойчивое воспламенение смеси при выбранном источнике инициирования. Для рассматриваемого реакционного механизма этот состав близок к нижнему концентрационному пределу воспламенения (4.2%). Для бедных смесей скорость горения мала, поэтому расширение очага горения достаточно

медленное и требуется учет эффектов плавучести в гравитационном поле. Детально исследовано изменение структуры всплывающего очага горения. На начальных стадиях процесса наблюдается прогрев смеси вокруг зоны энерговыделения за счет теплопроводности и диффузии частично прореагировавшей смеси, а также всплывание всей массы разогретого газа. С течением времени форма всплывающего очага горения меняется и принимает форму тора, причем зона реакции находится внутри очага и поддерживается за счет диффузии свежей смеси в зону горения. В последующем под воздействием акустических волн, отраженных от стенок, при всплывании рассматриваемого образования внутри него усиливаются пульсации, появляются области затухания горения, а также образуются очаги меньшего масштаба. При приближении к верхней стенке происходит распад наблюдаемого образования и формируется многоочаговый режим распространения пламени.

4. В главе 4 в разделе 4.1 фактически обосновывается новый метод контролируемого инициирования детонации, который энергетически более выгоден, чем прямое инициирование детонации и требует существенно меньших длин для формирования детонационной волны в сравнении с методом, когда при малых энергиях инициирования осуществляется переход от медленного горения к детонации, даже при использовании средств для турбулизации потока. В представленных в диссертации примерах показано, что инициирование детонации для стехиометрической водородно-кислородной смеси может быть реализовано на длинах в несколько сантиметров. Для инициирования детонации предлагается использовать слой горючей смеси с примесью инертных взвешенных частиц, которые нагреваются с помощью излучения. Разогрев горючей газообразной смеси с помощью теплового излучения от внешнего источника определяется поглощением частицами падающего на их поверхность излучения и переносом тепла с поверхности частиц окружающему газу. Течение описывается в рамках двухскоростной, двухтемпературной модели, построенной на основе уравнений Навье-Стокса для сжимаемой вязкой среды с учетом теплопроводности, многокомпонентной диффузии, химических реакций, протекающих в газовой фазе. Обмен энергией и импульсом между фазами рассматривается в приближении Стокса. Перенос излучения рассчитывается в диффузионном приближении. Задача рассматривается в одномерной постановке для водородно-кислородной смеси. Для выбранных

частиц микронного диаметра с заданными свойствами анализируются сценарии развития очагов воспламенения и инициирования детонации в локальном объеме в зависимости от начальной толщины слоя газовой смеси, заполненного частицами. Показано, что существует такой диапазон значений начальной толщины слоя газовой смеси с частицами, при котором нагрев частиц от внешнего источника теплового излучения с заданной интенсивностью обеспечивает формирование устойчивой детонации в газовой смеси. Проведены оценки влияния мощности источника теплового излучения на процесс воспламенения смеси и развитие горения с учетом конечного времени установления теплового равновесия между нагретыми частицами и окружающим газом. Получены ограничения на максимально допустимый поток тепла от источника излучения, при котором реализуются режимы инициирования устойчивой детонации.

5. В главе 4 в разделе 4.2 с помощью расчетного исследования выполнено обоснование метода нанесения микрочастиц на твердотельную подложку в импульсе детонационной волны. При малой массовой концентрации частиц в условиях быстропротекающих процессов в газозвеси влиянием частиц на течение газовой фазы можно пренебречь, а взаимодействие между частицами можно также не учитывать. Исследована динамика облака частиц в зазоре между срезом детонационной пушки и подложкой для частиц разного размера от 1 мкм до 100 мкм. Оценивается эффективность метода по выпадению частиц на подложку (процент частиц из первоначального облака, достигших подложки). Кроме того, изучено влияние специального профилирования подложки. Полученные результаты важны для практики, поскольку предлагаемый метод нанесения микрочастиц на твердотельную подложку в импульсе детонационной волны считается одним из самых перспективных среди методов газотермического напыления.

6. Важные новые результаты по развитию численных методов для задач горения и детонации, связанные с уменьшением в расчетах отрицательного эффекта схемной диссипации, присущего базовому эйлери-лагранжеву методу (ЭЛМ), представлены в главе 5 диссертации. Следует отметить, что аналогичный недостаток проявляется и при использовании многих других методов. Проведены исследования по адаптации метода КАБАРЕ, предложенного ранее для решения задач газовой динамики, для расчета нестационарных многокомпонентных реагирующих потоков. Адаптированная версия метода КАБАРЕ тестировалась на газодинамической задаче о распаде

произвольного разрыва, и показано, что размазывание контактного разрыва для метода КАБАРЕ значительно меньше, чем в случае ЭЛМ. Для многокомпонентной реагирующей смеси газов тестирование проводилось на представительном наборе задач: распространение ламинарного пламени, нестационарное развитие теплового взрыва на градиенте температуры, прямое инициирование детонации, распространение пламени в ограниченном объеме от локализованного источника воспламенения. В задаче о ламинарном пламени продемонстрированы заметные преимущества метода КАБАРЕ по скорости сходимости по расчетной сетке для ширины фронта пламени и нормальной скорости горения в сравнении с ЭЛМ. Преимущества метода КАБАРЕ по отношению к ЭЛМ наиболее полно проявились на задачах, где важную роль играет взаимодействие газодинамических и/или акустических процессов с протекающими химическими реакциями. Поэтому можно говорить об эффективности разработанной адаптированной версии метода КАБАРЕ для расчета нестационарных течений многокомпонентного реагирующего газа для всего класса задач, рассматриваемых в диссертации.

Достоверность результатов работы. В диссертации серьезное внимание уделяется подтверждению достоверности полученных расчетных результатов.

1. Прежде всего следует отметить, что в работе представлены результаты по всестороннему тестированию использованного метода расчета (ЭЛМ). Так, в таблице 1 на стр.38 отражены результаты тестирования и сравнения с экспериментальными данными и теоретическими оценками для задач распространения ударных волн, детонационных волн и ламинарного пламени. Отмечается хорошее соответствие расчетных данных с результатами теоретических оценок (для ударных волн) и лабораторных экспериментов для самоподдерживающейся детонационной волны и ламинарного пламени.

2. При решении задачи об ускорении фронта пламени и перехода к детонации в канале в трехмерной постановке при построении расчетной сетки в полной мере учитывался опыт решения соответствующей двумерной задачи и тестирования численного метода с тем, чтобы разрешать структуру фронта пламени и зоны реакций. Оставляя в стороне вопрос о правомочности выводов по структуре потока, сделанных в публикациях других авторов на основе интерпретации результатов экспериментальной визуализации трехмерных течений с помощью теневых фотографий (см. стр. 52 диссертации), следует отметить, что «численные» и экспериментальные теневые фотографии

течений качественно идентичны (см. рисунок 3.4), что подтверждает достоверность расчетных результатов.

3. При постановке задачи о развитии волны горения в обедненной смеси в замкнутом объеме использовались экспериментальные результаты по тепловой энергии источника, обеспечивающего устойчивое воспламенение обедненной водородно-воздушной смеси, по определению нижнего концентрационного предела воспламенения. Экспериментальные данные по нижнему концентрационному пределу использовались для валидации детального реакционного механизма, который использовался в расчетах для описания воспламенения и горения водородно-воздушной смеси.

4. При решении задачи об иницировании детонации путем лучистого нагрева инертных частиц, содержащихся в локализованном слое газозвеси, результаты экспериментальных исследований привлекались для выбора характерных параметров задачи. В частности, поток излучения с поверхности источника выбран в соответствии с условиями эксперимента.

Научная значимость работы. Научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов в следующих областях: ускорение пламени и переход к детонации в канале; эволюция очага пламени в замкнутом объеме, заполненном бедной топливно-воздушной смесью; контролируемое иницирование детонационной волны с помощью излучения, которое нагревает химически нейтральные частицы, расположенные в локальном слое водородно-кислородной смеси. Научная ценность проведенных исследований обусловлена также полнотой используемой математической модели течения, описания физических и химических процессов. Расчеты выполняются с помощью численного метода, применимость которого подтверждена тестовыми расчетами.

Практическая значимость работы. Полученные в диссертации результаты относятся к фундаментальным исследованиям. Однако информация о механизмах перехода от дефлаграции к детонации, опыт использования численных методов, отдельные результаты, полученные в диссертации, безусловно, представляют интерес для последующих прикладных исследований.

Во-первых, это относится к способу контролируемого иницирования детонации с помощью излучения, которое нагревает частицы, размещаемые в

тонком локальном слое горючей смеси. Правда, в этом случае следует учитывать идеализированную постановку задачи на данном этапе исследований (вопросы создания газозвеси с твердыми частицами, размещения источника излучения в составе импульсного детонационного двигателя).

Во-вторых, практический интерес представляют результаты, полученные в диссертации по развитию волн горения в бедной водородно-воздушной смеси вблизи нижнего предела воспламенения. Эти данные, а также соответствующая программа расчета могут оказаться полезными при прогнозировании пожаро- и взрывобезопасности на АЭС. Этот вопрос, однако, требует контактов и консультаций со специалистами специализированного института ИБРАЭ РАН (Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН) и отрасли.

В соответствии с полученными результатами наиболее проработанным направлением для практического применения представляется метод нанесения покрытий из микрочастиц на твердотельную подложку в импульсе детонационной волны. Этот метод может представлять интерес для ФГУП «ВИАМ» (Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»). Однако, представляется, что нужен промежуточный этап, который включал бы проверку предлагаемого метода на лабораторной экспериментальной установке с целью подтверждения выводов диссертации по этой задаче, сделанных на основании расчетных исследований.

Замечания и пожелания.

1. При проведении трехмерных расчетов (см. главу 3) для стехиометрической водородно-кислородной смеси в канале предварительно моделировалось течение в канале меньшего поперечного сечения для трех разных случаев задания параметров в слое инициирования: воспламенение в слое без возмущения; регулярные малые возмущения поверхности нагретого слоя; случайные малые возмущения. Как следует из результатов, представленных на рисунке 3.1, топология поверхности фронта пламени различается существенно для трех рассмотренных случаев. Основной расчет для канала большего поперечного сечения проводился с заданием третьего типа условий (см. рисунок 3.3). В диссертации на стр.51 содержится утверждение, что «динамика развития волны горения во всех трех случаях

остается неизменной». Информации, иллюстрирующей это утверждение, к сожалению, в диссертации нет. Было бы полезно привести соответствующие данные, например, на рисунке 3.2 для динамики скорости и давления ведущей точки поверхности фронта пламени. Конечно, это связано с трудоемкими дополнительными расчетами. Но для канала меньшего поперечного сечения такие расчеты были выполнены, поэтому соответствующие результаты, иллюстрирующие вышеприведенное утверждение, могли бы быть представлены.

2. Следует отметить, что для анализа роли волн сжатия в развитии горения в канале (раздел 3.1.2 диссертации), использовался «метод движущихся источников энерговыделения конечного размера». Этот метод используется также при интерпретации результатов и в разделе диссертации 3.2. Было бы целесообразно дать в диссертации краткое описание этого метода анализа результатов трехмерных расчетов.

3. В диссертации в разделе 3.2 отмечается, что на завершающей стадии процесса ускорения пламени, предшествующего возникновению детонации, важную роль играет механизм, связанный с влиянием давления на время индукции водородно-кислородной смеси (см. обсуждение результатов на стр. 59, 60). В рассмотренном примере для анализируемых условий время индукции уменьшается с ростом давления. На рисунке 3.7 представлена соответствующая зависимость. В работе используются два реакционных механизма для окисления водорода. Возникает вопрос о влиянии кинетической модели на зависимость, представленную на рисунке 3.7. Этот вопрос важен и в связи с исследованиями, проведенными в разделе 3.2 диссертации.

Сделанные замечания и пожелания не меняют общей положительной оценки выполненного исследования.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных школах, конференциях и коллоквиумах, включая Всероссийские и международные. Соответствующий список включает 22 наименования. Работы диссертанта хорошо известны специалистам.

Публикации. Результаты работы опубликованы в 10 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

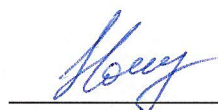
Личный вклад автора правильно и полно отражается в диссертации и в автореферате.

Диссертационная работа была заслушана на НТС отделения 600 «Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и в элементах реактивных двигателей», Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», протокол №60 от 20.04.2017 г.

Диссертация «Режимы распространения пламени в химически активных газах и газозвесах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Яковенко Иван Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

К.ф.-м.н., с.н.с.,

И.о. начальника отделения 600
«Неравновесные физико-химические
процессы в газовых потоках и
в элементах реактивных двигателей»



Копченов В.И.

111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д.2,

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 8 (495) 361-09-30, kop@ciam.ru

Государственный научный центр

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»), 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д.2, 8 (495) 763-57-47, avim@ciam.ru