

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертационную работу Киверина Алексея Дмитриевича
«Нестационарные режимы горения и формирования детонации в газообразных и дисперсных средах» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация Киверина А.Д. посвящена численному исследованию и систематизации многообразных нестационарных процессов, связанных с воспламенением, распространением горения в режиме дефлаграции (дозвукового диффузионного пламени) и переходом его в детонацию в газе. Работа является в высшей степени **актуальной**, поскольку нестационарные режимы горения возникают в самых разнообразных энергетических устройствах – от реакторов тепловых электростанций до автомобильных и авиационных двигателей. В последнее время активно исследуются возможности применения детонационного горения (не только в двигателях), поэтому актуальна проблема оптимизации процессов при переходе горения в детонацию (далее – ПГД); эти процессы всесторонне и глубоко изучены в данной работе. Физические явления, рассматриваемые в диссертации, имеют значение и для прогнозирования и предотвращения взрывов на производстве. Понимание происходящих при этом явлений затруднено из-за взаимодействия многих физических эффектов – молекулярной диффузии тепла и массы, химической кинетики с изменяющимися сценариями, турбулентности, акустических воздействий, непрерывных и ударных волн, трения и теплообмена на стенках канала, отрывов пограничного слоя и др. Для понимания и эффективного управления процессами, связанными с распространением пламени, исключительно актуальной задачей является классификация сценариев распространения горения. В диссертации Киверина А.Д. такая классификация предложена, и автор демонстрирует на многочисленных примерах эффективность ее использования.

Объем диссертации - 284 страницы. Диссертация содержит 121 рисунок. Список литературы – всесторонняя, компетентно составленная библиография по теме работы, состоящая из 249 наименований. Основной текст диссертации состоит из введения, пяти глав и заключения. Введение содержит необходимые формальные характеристики диссертационной работы и список публикаций по теме диссертации – 39 работ, в том числе 37 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК, 35 из которых индексированы в международных системах WebOfScience и Scopus. Каждая глава диссертации начинается с вводной части, которая содержит описание решаемой проблемы, обзор предыдущих исследований по данной теме и четкую формулировку личного вклада автора в те работы, которые были выполнены им с соавторами и опубликованы по данной теме. Главы расположены в хронологической последовательности, по порядку обращения автора к различным задачам, и видно, как увеличивается авторский вклад, как растет самостоятельность автора как исследователя. Во всех главах все расчетные исследования или большая их часть выполнены автором. Но если в начальных главах он участвует в обсуждении и анализе результатов, предлагает некоторые существенные идеи, то к концу (особенно в последней главе) он и ставит задачу, и предлагает способ ее решения, и на основе анализа формулирует существенные физические положения. После вводной части в каждой главе описывается кратко математический подход к решению задачи, а в конце каждой главы кратко суммируются полученные результаты.

Все численные исследования выполнены с использованием собственных программ, разработанных в ОИВТ РАН при существенном участии автора. Нестационарные течения с горением моделируются на базе полных (не осредненных по времени или пространству) нестационарных уравнений Навье-Стокса для многокомпонентного неравновесно реагирующего сжимаемого газа, с учетом бинарной молекулярной диффузии и

нелинейной термодинамики химических компонент, замкнутых различными (детальными или усеченными) кинетическими механизмами. Расчеты ведутся в приближении одномерного, двумерного или трехмерного течения на равномерных сетках с достаточно малым шагом (порядка 10^{-5} м). Для аппроксимации конвективных потоков, как правило, используется явная низкодиссипативная схема “кабаре” 2-го порядка аппроксимации (в отдельных случаях – метод «крупных частиц»). Диффузионные потоки аппроксимируются при помощи конечно-разностной схемы 2-го порядка по пространству, химические источниковые члены – с использованием локально-невяного метода Гира для жестких систем. Порядок аппроксимации по времени в целом первый.

В Главе 1 рассмотрены базовые физические механизмы нестационарного горения газовых смесей в ограниченных объемах. Выписана система уравнений Навье-Стокса для газофазных систем с неравновесными реакциями. Затем продемонстрировано, что используемые автором средства численного моделирования способны описать стационарное распространение волны дефлаграции от точечного источника в реакторе большого объема. Для смесей различного состава получена скорость нормального горения, попадающая в разброс экспериментальных данных. Далее демонстрируется возможность моделирования ускорения пламени в канале, которое связано с его гидродинамической неустойчивостью, приводящей к искривлению фронта пламени и, следовательно, к увеличению средней по сечению скорости переработки реагентов. Представлены двумерные расчеты распространения пламени в полуоткрытом канале от закрытого торца с условием скольжения на стенках. Показано, что возмущения фронта пламени, внесенные вначале, обнаруживают тенденцию к перестройке спектра в направлении усиления длинноволновых мод и формированию “пальцеобразной” формы фронта пламени. Результаты расчета согласуются с теоретическими оценками максимальной скорости пламени для каналов небольшой ширины, а при дальнейшем увеличении ширины канала дают значения, превосходящие эти оценки.

Далее рассматривается процесс ускорения пламени в полуоткрытом канале. Для понимания причин ускорения автор предлагает рассматривать фронт пламени как движущийся источник энергии, который излучает вперед и назад волны сжатия. Сложение волн сжатия, излученных в последовательные моменты (а также волн сжатия, излученных назад и отразившихся от торца), непрерывно увеличивает скорость потока перед пламенем и, следовательно, повышает скорость пламени в лабораторной системе отсчета. Автор обращает внимание на изменение динамики пламени по мере его ускорения и постепенного приближения к скорости звука в продуктах сгорания и представляет результаты своих расчетов, которые вполне согласуются с экспериментами и расчетами других авторов. К сожалению, причина генерации волн сжатия нигде в диссертации не объяснена. Само наличие волн сжатия сомнений не вызывает, многократно наблюдалось в экспериментах и продемонстрировано самим автором в диссертации (например, рис.5.2). По мнению оппонента, причиной формирования волн сжатия является то, что искривление пламени и увеличение площади его поверхности вызывает локальные нарушения стационарных законов сохранения (неизбежность таких нарушений показана в классической книге Я.Б.Зельдовича и А.С.Компанейца). Также в Главе 1 рассматривается формирование ячеистых пламен при развитии горения в канале, закрытом с обоих концов. Полученная в расчетах зависимость скорости пламени от ширины канала для широких труб согласуется с многочисленными экспериментами. Автор объясняет механизм формирования ячеек, связанный с неустойчивостью фронта пламени и генерируемыми при этом акустическими волнами.

Наконец, на основе описанного опыта автор обосновывает свой выбор методики численного моделирования нестационарного горения. Необходимость описания, с одной стороны, длительных нестационарных процессов в многомасштабном потоке (что ведет к большим компьютерным затратам), а с другой стороны, необходимость учета

акустических волн малой амплитуды естественно приводит к низкодиссипативным схемам 2-го порядка аппроксимации с хорошими дисперсионными свойствами. Автор использует одну из таких схем – схему “кабаре”.

В **Главе 2** рассматривается задача об иницировании волн горения в горючей газовой смеси при локальном подводе энергии. В классической работе 1980 г. Я.Б.Зельдович предложил для случая одноступенчатой экзотермической реакции классификацию режимов развития горения в неравномерно нагретом поле течения, основанную на соотношении между скоростью спонтанной волны горения U_{sp} (величина скорости связана с протяженностью зоны изменения температуры L) и характерными скоростями, присутствующими в задаче: скоростью пламени относительно исходной смеси u_f , скоростью детонации Чепмена-Жуге D_{CJ} и скоростью звука в исходной смеси a_f . Было выделено несколько сценариев развития горения: прямое иницирование детонации, сверхзвуковое распространение пламени с развитием усиливающейся волны давления и последующим ПГД и дозвуковое распространение пламени без ПГД. В диссертации А.Д.Киверина предложен уточненный вариант этой классификации. Во-первых, уточнен набор характерных скоростей (теперь это, кроме u_f , скорость звука за волной Чепмена-Жуге a_{CJ} , скорость звука за ударным фронтом детонации a_N и скорость звука в продуктах сгорания a_b). Во-вторых, показано различие сценариев воспламенения при наличии или отсутствии температур, превосходящих т.н. “продленный второй предел воспламенения”, который возникает только при рассмотрении детальной кинетики горения и связан с изменением кинетического механизма. Все варианты были воспроизведены в параметрических одномерных расчетах. На диаграмму $L-T^*$ (T^* – максимальная температура в исходном температурном поле) нанесены области реализации различных режимов воспламенения (для различных начальных давлений газа p^*). Показано, что детальный кинетический механизм и модель одноступенчатой реакции дают существенно различные границы областей между режимами. Остается сожалеть, что в работе не рассмотрена зависимость режима воспламенения от начального состава смеси.

Далее Киверин А.Д. предлагает оригинальную классификацию режимов воспламенения от локализованного источника энергии. Как и в задаче о неравномерно нагретом поле течения, эта новая классификация основана на рассмотрении соотношения между характерными масштабами задачи. В данном случае это время подвода энергии, время задержки воспламенения, время распространения малых (акустических) волн давления в пределах области подвода энергии и время распространения волны теплопроводности в пределах той же области. Представлены результаты параметрических одномерных расчетов поджига стехиометрической смеси H_2/O_2 при атмосферном давлении. На основе этих расчетов сформулирован вынесенный автором на защиту механизм формирования волн реакции, включая детонацию, заключающийся в формировании неравномерного распределения температуры и развитии нестационарного теплового взрыва на его фоне. Найдены три варианта развития горения: при очень быстром энергоподводе – объемное воспламенение, при медленном – горение при давлении, выровненное акустикой, по градиентному механизму Я.Б.Зельдовича, и промежуточный вариант с градиентным механизмом, но при переменном давлении (с образованием ударной волны и волны разгрузки, уносящей энергию из области подвода энергии). Построена диаграмма зависимости минимальной энергии, необходимой для воспламенения смеси, от длины области поджига. Автор понимает, что в трехмерном случае диаграмма будет существенно иной, и дает график оценочных поправок для трехмерного случая. Для наиболее интересного промежуточного варианта поджига (он соответствует короткому высокомоментному импульсу энергии) установлено: если начальная скорость фронта горения превышает скорость звука в продуктах горения, то происходит постепенное ускорение волны горения со сжатием и формированием

детонации. В противном случае разрежение, формирующееся в области поджига, препятствует ПГД. Имеется экспериментальное подтверждение этого вывода.

Глава 3 посвящена воспламенению в ударных трубах, когда в результате разрыва диафрагмы в канале происходит распад разрыва между высоконапорным инертным газом и находящейся при низком давлении холодной горючей смесью. Данная задача имеет важное практическое значение, поскольку такой способ воспламенения иногда рассматривается как хороший способ определения задержки воспламенения. В Главе показано, что при этом возможны неидеальные эффекты газодинамической природы, связанные с тем, что воспламенение протекает не равномерно, а из отдельных очагов. Для этого выполнены расчеты движения газа в ударной трубе за падающей ударной волной и за волной, отраженной от закрытого торца трубы: двух- и трехмерные расчеты при выключенных химических реакциях и двухмерные расчеты с горением. Во всех расчетах на стенках канала ставилось условие прилипания. Были сопоставлены расчеты в приближении адиабатических и холодных изотермических стенок. В расчетах без горения было установлено, что выбранная математическая постановка задачи и расчетная сетка позволяют смоделировать нестационарный пограничный слой, развивающийся в потоке за падающей ударной волной. В этом слое из-за гидродинамической неустойчивости развиваются волны Толлмина-Шлихтинга (ТШ), которые имеют вид движущихся вихрей, ось которых перпендикулярна плоскости течения (автор называет их “роликовыми вихрями”), которые постепенно нарастают по размеру, после чего течение теряет устойчивость. Автор выполнил специальные исследования, подтвердившие, что растущие вихри попадают в зону неустойчивости на классической диаграмме устойчивости ламинарного пограничного слоя. При охлаждаемой стенке возвратное течение внутри вихрей является холодным; однако обтекание волн ТШ внешним потоком приводит к формированию между вихрями зон пониженной скорости и повышенной температуры, превышающей статическую температуру невязкого ядра потока. В расчетах с химическими реакциями воспламенение начинается именно в этих областях, приводя к существенно неравномерной, неидеальной картине развития горения, которая может быть причиной некорректных результатов при определении задержек воспламенения. Сформулированы рекомендации к интерпретации экспериментальных измерений в реакторах на основе ударных труб.

В **Главе 4** рассматривается развитие горение в дисперсной среде, представляющей из себя взвесь твердых инертных микрочастиц в реагирующем газе. Исследуется возможность инициирования волн горения и детонации в результате разогрева твердых микрочастиц от стороннего источника теплового излучения. К уравнениям Навье-Стокса добавляются уравнения для числа частиц, импульса и энергии дисперсной среды, содержащие источники, которые описывают обмен импульсом и теплом с газовой средой, а также источники энергии, описывающие нагрев частиц излучением и излучение самих частиц. Газ считается прозрачным для излучения. Перенос излучения в среде вдоль выделенного направления рассчитывается в диффузионном одно- или многогрупповом приближении (многогрупповое приближение учитывает наличие различных свойств распространения и поглощения излучения для частиц разного размера).

Рассмотрено распространение пламени по газу, равномерно или неравномерно засеянному микрочастицами, которые нагреваются от излучения, создаваемого пламенем. Даны теоретические оценки прогрева микрочастиц на разных расстояниях перед фронтом пламени. Установлено, что в случае равномерного засева газа частицами разогрев газа происходит лишь в небольшом слое перед пламенем, тогда как при неравномерном засеве возможно возникновение очагов воспламенения на расстоянии перед пламенем, что может существенно интенсифицировать процесс сгорания газа. При этом возникает градиент температуры горючей смеси, что вызывает генерацию быстрых волн горения, ударных и детонационных волн по механизмам, описанным в Главе 2.

Также рассмотрено инициирование горения путем лучистого нагрева облака взвешенных частиц. В этом случае при возникновении горения в газе, окружающем облако, начинается расширение газа, приводящее к выносу микрочастиц из первичного облака. Автор установил однозначную взаимосвязь между развитием горения и величиной температурного градиента, соответствующую классификации, предложенной в Главе 2. При небольших значениях градиента температуры может возникнуть сверхзвуковая спонтанная волна горения, которая далее будет развиваться по одному из описанных в Главе 2 сценариев, в том числе – с возникновением ПГД. Автором сформулирована новая концепция прямого инициирования детонации в газе путем лучистого нагрева облака частиц от стороннего источника. Построены критерии формирования различных режимов горения газообразной смеси, инициированных от локального воспламенения нагретого облака микрочастиц. Недостатком этой Главы является отсутствие сопоставления расчета с какими-либо экспериментальными данными, которые могли бы подтвердить корректность сделанных выводов.

Последняя, самая большая, **Глава 5** посвящена детальному анализу процесса ПГД в газообразных смесях. На основе обзора экспериментальных данных и данных численного моделирования (включая собственные расчеты) автор предлагает классификацию режимов сверхзвукового горения в каналах. Он выделяет четыре стадии ускорения пламени от закрытого торца: ускоряющееся “пальцеобразное” пламя, квазистационарное “тюльпанообразное” пламя, ускоряющееся запертое пламя и, наконец, финальная стадия (либо установление высокоскоростного квазистационарного пламени, либо формирование волны самовоспламенения, либо ПГД). Особое внимание уделяется режиму “запертого пламени”. Детальный анализ структуры пламени в этом режиме, механизм распространения “запертого пламени” и условия его устойчивости вынесены автором на защиту. “Запертым” автор называет пламя, скорость которого $(u + u_f)$ превышает скорость звука в продуктах сгорания a_b , так что акустические волны, распространяющиеся в продуктах сгорания позади пламени, перестают оказывать влияние на его распространение. Новые волны сжатия, излучаемые из зоны реакции вперед, оказываются запертыми внутри фронта пламени, что обеспечивает дополнительное сжатие смеси, поступающей во фронт горения. При этом начинают меняться скорость пламени относительно газа (u_f) и скорость звука в продуктах сгорания a_b . Если $\Delta u_f > \Delta a_b$, режим “запертого пламени” пламени сохраняется, сжатие продолжается и в конце концов внутри фронта пламени формируется ударная волна и происходит ПГД. Если же $\Delta u_f < \Delta a_b$, то “запертое пламя” неустойчиво, волны сжатия уходят из области пламени, пламя тормозится, затем снова ускоряется за счет идущих сзади и догоняющих его волн сжатия, и процесс повторяется, выходя на режим околозвукового квазистационарного пламени. В менее активных смесях в случае $\Delta u_f < \Delta a_b$ возможен переход от диффузионного распространения пламени к спонтанной волне самовоспламенения. Автором сформулирован количественный критерий реализации последнего сценария. Описанные выше сценарии развития пламени воспроизведены в двумерных расчетах горения смеси H_2/O_2 с условием прилипания на стенках. Наконец, сформулированные автором критерии реализации различных режимов быстрого горения рассчитаны для различных течений водородо-кислородной, водородно-воздушной, ацетилено-воздушной и ацетилено-кислородной смесей. Получено хорошее согласие с экспериментом.

Затем рассмотрен процесс ПГД в канале с препятствиями (этот способ ускорения ПГД в каналах очень популярен в последнее время; например, в ФИЦ ХФ РАН С.М.Фроловым запатентованы несколько вариантов организации быстрого ПГД за счет препятствий и предложены многочисленные практические применения этих способов).

Представлены результаты двумерных расчетов в приближении адиабатических стенок с прилипанием, в которых были воспроизведены все возникающие в экспериментах режимы. При этом полученные характеристики режимов оказались весьма близки к доступным экспериментальным данным. Показано, что в таких задачах режим запертого пламени если и возникает, то лишь эпизодически. Основным механизмом ПГД является взаимодействие ударных волн с препятствиями. Критерий возникновения очагов самовоспламенения при таком взаимодействии был сформулирован в работе G.Thomas et al (Shock Waves, 2002). Автором сформулирована методика, позволяющая оценивать значение этого критерия, и показано, что она позволяет эффективно предсказывать пределы ПГД.

Также рассмотрены задачи с ПГД в результате взаимодействия пламени с ударными волнами, порожденными внешними источниками. Проведены двумерные расчеты взаимодействия пламени с ударными волнами различной интенсивности в канале со стенками без прилипания (для исключения сторонних эффектов) Выполнена классификация различных сценариев ПГД; показано, что наиболее общим механизмом перехода является локализация пика давления в зоне реакции. Затем исследован процесс ускорения пламени и ПГД в закрытом объеме. Предложена классификация импульсных нагрузок на стенки объема при развитии горения. Наиболее опасными являются режимы ПГД поблизости от нагружаемой поверхности.

Наконец, рассмотрен ПГД при свободном распространении пламени в открытом пространстве. Проведены двумерные расчеты развития цилиндрического пламени при различных вариантах задания начальных данных, и выполнено сопоставление с теорией автомодельного режима распространения пламени, предложенной в работе Ю.А.Гостинцева и др. (ФГВ, 1988). На промежуточных стадиях расчета достигнуто неплохое согласование с теорией. На финальной стадии расчетов наблюдался ПГД. На основе анализа расчетов автором впервые предложен следующий механизм ПГД в открытом пространстве: если на расширяющейся поверхности фронта пламени возникают возмущения с критической длиной волны, то они растут и порождают волны сжатия. Взаимодействие волн сжатия с фронтом пламени (при распространении вдоль его поверхности) приводит к их усилению. В результате могут создаться условия для формирования детонационной волны. На основе полученных данных автор заключает, что ПГД в свободных пламенах может реализоваться лишь в крайне высокоактивных смесях.

Автореферат вполне отражает содержание диссертационной работы.

По результатам рассмотрения диссертации Киверина А.Д. можно сделать следующие замечания.

1. В диссертации, основанной на численных исследованиях, слишком мало места уделено методическим вопросам численного моделирования. Численные методы описаны лишь на уровне ключевых слов. Отсутствует информация о структуре используемых расчетных сеток, о размере и форме ячеек, о сходимости численного решения по сетке, о шаге по времени и о величине обобщенного числа Куранта (отношении шага по времени к ограничению на шаг по времени для явной схемы). Естественно, все эти вопросы не являются главными в работе, которая сконцентрирована на анализе физики течения, но сбрасывать их со счетов нельзя, поскольку численные погрешности могут приводить к неправильному описанию физических процессов, особенно в задачах с длительными нестационарными процессами и с неустойчивым характером течения. Стоит отметить, однако, что ответы на многие вопросы можно найти в публикациях автора [I, XIV, XIX, XXV, XXXV].

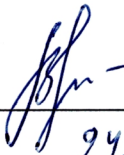
2. Согласно классическим представлениям (К.И.Щелкин, Я.Б.Зельдович), ключевым фактором в ускорении дефлаграционного пламени является турбулентность потока. Именно турбулентность приводит к увеличению площади пламени. Шлирен-фотографии ускоряющегося диффузионного пламени подтверждают существенно завихренный, фрактальный характер поверхности пламени. Хотя расчеты, представленные в диссертации, выполнены на очень подробных сетках, сеточное разрешение все же не достаточно для описания полного турбулентного каскада, и турбулентность описывается фактически в режиме LES – неявного прямого моделирования крупномасштабной турбулентности. Не очевидно, что используемая автором низкодиссипативная схема “кабаре” способна правильно воспроизвести вклад от не разрешенной сеткой диссипативной части турбулентного спектра. Лаборатория моделирования турбулентных течений с горением, которую представляет официальный оппонент, имея значительный опыт использования различных вариантов метода LES, считает более надежными расчеты, в которых эффекты подсеточной турбулентности учитываются явно при помощи тех или иных полуэмпирических моделей. Кроме того, все расчеты ускоряющихся пламен выполнены автором в двумерной постановке. Известно, что двумерная турбулентность отличается по свойствам от трехмерной (в частности, для нее характерен “обратный каскад” – тенденция к объединению мелких вихрей в более крупные, что может объяснить некоторые результаты, полученные автором в расчетах). Также нужно иметь в виду, что в турбулентном горении всегда существенны явления, протекающие на уровне мельчайших вихрей, не разрешаемых сеткой при LES-подходе. Поэтому в LES-расчете должны использоваться полуэмпирические модели, учитывающие взаимодействие турбулентности с горением. Значительная часть выполненных автором расчетов успешно сопоставлена с экспериментом и теорией, и это во многом обосновывает достоверность представленных в диссертации результатов. Но при отклонении от известных экспериментальных данных есть вероятность неожиданных численных эффектов, связанных с некорректным описанием турбулентной структуры пламени.
3. Теплообмен на стенках может играть существенную роль при формировании формы ускоряющегося пламени, а также при возникновении очагов самовоспламенения. В диссертации выполнены расчеты либо в приближении адиабатических стенок, либо в приближении холодных изотермических стенок (что дает оценку тепловых потоков сверху). В реальности процесс протекает сложнее, - температура стенок меняется по мере их постепенного нагрева, что может изменить сценарии развития пламени. Также трение на стенках и теплообмен существенно меняются при наличии шероховатости. Рекомендуется учесть эти эффекты в дальнейших исследованиях автора.

Указанные недостатки ни в коей мере не снижают научную ценность диссертации Киверина А.Д. Высокая теоретическая значимость работы несомненна. Автором установлен ряд новых физических механизмов ускорения дефлаграции и перехода горения в детонацию (ПГД). Представлена впечатляющая попытка классификации многообразных физических процессов, протекающих при нестационарном развитии пламени и переходе горения в детонацию. Сформулированы критерии реализации различных режимов и условия их устойчивости. Представлены многочисленные примеры использования этих критериев при анализе сложных течений с развивающимся горением. Полученные автором данные, конечно, могут быть применены в практических приложениях – при разработке энергетических устройств, для прогнозирования и предотвращения взрывов на производстве. Результаты диссертационной работы могут использоваться в научно-исследовательских работах в таких институтах как ЦАГИ, ЦИАМ, ФИЦ ХФ РАН, ИТПМ СО РАН и др.

Диссертация Киверина А.Д. является законченным, самостоятельным, масштабным научным исследованием, которое представляет существенный вклад в теорию горения и детонации. Диссертация соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Киверин Алексей Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил заместитель начальника
Лаборатории физического и численного
моделирования течений с горением
Отделения аэродинамики силовых установок
ФГУП «ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского»

доктор физико-математических наук, доцент
140180, Московская область, г.Жуковский, ул.
Жуковского, д.1, (916) 660-71-27,
vlaskenko.vv@yandex.ru


Власенко В.В.
27.08.2021

Подпись Власенко В.В. удостоверяю

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 403.004.01 ЦАГИ
доктор физико-математических наук, доцент
140180 Московская область, г.Жуковский, ул.
Жуковского, д.1, (495) 556-43-38, disssovet@tsagi.ru



Брутян М.А.

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

140180, Московская область, г.Жуковский, ул. Жуковского, д.1,
8 (495) 556-43-03, info@tsagi.ru