

## ОТЗЫВ

на диссертацию А.В. Способина «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твердыми частицами», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Структурно содержание диссертации четко делится на **две равноценных по объему и по значимости части**. Хотя эти части объединены общей темой – сверхзвуковое обтекание тел потоком газа с частицами, как это отражено в названии, они различны по объекту исследования, по методам моделирования и по акцентам при анализе результатов.

Первая часть связана с **моделированием очень сложных двухфазных течений газа с примесью дисперсных твердых частиц**, вторая часть – с **детальным моделированием динамики и воздействия на ударный слой и головную ударную волну крупных частиц, движущихся навстречу потоку**. На мой взгляд, разумно дать оценку каждой части отдельно.

Но начну я с небольшого отступления. В механике модели традиционно воспринимаются как математические модели, описываемые, как правило, дифференциальными уравнениями. Однако современный взгляд на моделирование отличается от классического. Недостаточно записать только уравнения, необходимо еще и разработать методы их решения, включающие в себя алгоритмы и способы их численной реализации. Всё это вместе и представляет собой вычислительную модель, которая позволит получить ответы на фундаментальные вопросы и решить конкретные задачи.

Диссертация А.В. Способина посвящена разработке именно **новых вычислительных моделей** в механике газозвесей и в задаче о движении крупных частиц в ударном слое, а также исследованию с помощью этих моделей **эффектов, которые ранее не были изучены или были изучены недостаточно**. Ввиду изложенного выше тема диссертации является, несомненно, **актуальной**.

Переходя к анализу каждой из двух частей диссертации, отмечу, что положения, выносимые на защиту, содержат 15 пунктов и занимают 6 с небольшим страниц. Не разбирая подробно каждый пункт, скажу, что в целом я

согласен со всеми положениями. Поэтому разрешите остановиться не на всех, а только на принципиально важных научных результатах и выводах в диссертации и обратить внимание автора и членов диссертационного совета на имеющиеся спорные моменты и некоторые недостатки.

## Часть I

### (Моделирование двухфазных течений газа с частицами; главы 1, 2 и 3)

Двухфазные течения газа с частицами – одно из направлений механики многофазных сред. Такие течения возникают в задачах внешней аэродинамики при движении летательных аппаратов в запыленной атмосфере, в задачах газодинамики проточных трактов турбомашин, сепарации примесей, пневмотранспорта и т.п.

Как и все многофазные течения, течения газа с частицами, рассматриваемые в диссертации, многомасштабны. Характерными масштабами здесь являются размер обтекаемого тела, размер дисперсных частиц примеси (который на несколько порядков меньше размера тела), длины динамической и тепловой релаксации частиц в потоке, средняя длина свободного пробега частиц между столкновениями друг с другом и т.п.

Такие течения сопровождаются сложным взаимным влиянием различных факторов – динамическим взаимодействием между несущей и дисперсной фазами, конвективным и радиационным межфазным теплообменом, хаотизацией движения частиц при столкновениях между ними. Отскок частиц от поверхности, их рассеяние из-за несферической формы, что типично для многих случаев, шероховатость поверхности, возможная абразивная эрозия дополнительно существенно усложняют течение.

Проблема моделирования течений с учетом всех названных и неназванных факторов в настоящее время далека от своего окончательного решения.

**Наиболее значимыми результатами диссертации в этой части являются следующие:**

**Первое.** Автор разработал и реализовал вычислительную модель обтекания тел газа с частицами с учетом большого числа факторов: различных

составляющих межфазной силы (силы сопротивления и силы Магнуса), аэродинамического момента, действующего на частицы, межфазного конвективного и радиационного теплообмена, столкновений между частицами, обратного влияния примеси на течение газовой фазы, эрозионного воздействия примеси на тело и влияние изменения формы тела на структуру течения в ударном слое. Известные предшествующие модели учитывали большинство этих факторов, однако не учитывали одновременно столкновения между частицами, эрозионное разрушение тела и радиационный теплообмен.

**Второе.** Разработана модель течения **моно- и полидисперсной** примеси, основанная на **прямом моделировании движения и столкновений между частицами**. Такой подход потребовал разработки нового алгоритма и новой технологии расчета движения и столкновений очень большого числа частиц (порядка 10 млн.), которые принципиально отличаются от используемых другими авторами (А.Л. Стасенко с соавторами) и метода Монте-Карло (А.Н. Волков и Ю.М. Циркунов). Автор уделил большое внимание исследованию точности своего подхода, выполнив расчеты также по методу Монте-Карло и сравнив результаты.

**Третье.** Разработан и исследован **алгоритм прямого моделирования** динамики примеси **с использованием частиц-представителей** (моделирующих частиц – simulated particles). Подобный подход широко используется в методе Монте-Карло. Развита автором технология применительно к прямому моделированию динамики примеси реализована, насколько я знаю, **впервые**.

Разработанные **вычислительная модель, алгоритм и технология компьютерного прямого моделирования движения и столкновений между частицами** имеют важное значение для механики газозвесей и являются **самым сильным научным результатом** Части I диссертации.

Отмечу, что в настоящее время в России, насколько мне известно, только три научные группы могут численно моделировать двухфазные течения со столкновениями между частицами: группа Д.Л. Ревизникова, в которую входит соискатель, группа А.Л. Стасенко в ЦАГИ и группа Ю.М. Циркунова в "ВОЕНМЕХЕ". За рубежом также очень небольшое число групп, прежде

всего, в Японии, Израиле, Франции и Германии, занимаются подобными расчетами. В 2021 году появилась, по-видимому, первая статья на эту тему исследователей из США ("Journal of Computational Physics", авторы из Стэнфордского университета). Причина такого положения дел состоит, на мой взгляд, в определенных трудностях, связанных как с математическим аппаратом описания данного явления, основанным на вероятностном подходе, многомерных функциях распределения и обобщенном уравнении Больцмана (всё это не является дежурным блюдом инженерного образования), так и трудностях, связанных с созданием эффективных и адекватных вычислительных моделей.

### **Замечания по Части I (главы 1, 2 и 3).**

Они, как в дальнейшем и замечания по Части II, имеют, во многом, характер пожеланий научного редактора и направлены на улучшение качества изложения материала.

1. В диссертации список литературы включает 361 источник, в том числе 287 ссылок на работы других авторов. Список содержит практически все наиболее важные публикации. Хотя понятно, что упомянуть все работы невозможно, я бы добавил в обзор еще несколько статей, имеющих прямое отношение к теме исследований автора, а именно:

- [1]. Рамм М.С., Шмидт А.А. Влияние частиц, отраженных от поверхности, на картину сверхзвукового обтекания затупленного тела потоком газозвеси. *Численные методы в механике сплошной среды*, 1986, т. 17, № 6, с. 108–113.
- [2]. Давыдов Ю.М., Еникеев И.Х., Нигматулин Р.И. Расчет обтекания затупленных тел потоком газа с частицами с учетом влияния отраженных частиц на течение газозвеси // *ПМТФ*. 1990. № 6. С. 67.
- [3]. Голубкина И.В., Осипцов А.Н., Сахаров В.И. Обтекание плоского цилиндра сверхзвуковым слабозапыленным потоком при взаимодействии головной ударной волны с косым скачком уплотнения // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2011. № 1. С. 59–72.
- [4]. Трунев А.П., Фомин В.М. Обтекание тел двухфазным потоком типа газ–твердые частицы с учетом эрозии // *Прикладная механика и техническая физика*, 1983. № 1. С. 69–75.

- [5]. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Особенности обтекания затупленного тела сверхзвуковой полидисперсной струей с закруткой отраженных частиц // ТВТ. 2011. Т. 49. № 1. С. 73.
- [6]. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Взаимодействие двухфазной струи и твердого тела с образованием “хаоса” частиц // ТВТ. 2013. Т. 51. № 4. С. 598.
- [7]. Ishii R., Hatta N., Umeda Y., Yuhi M. Supersonic gas-particle two-phase flow around a sphere. *J. Fluid Mech.*, 1990, Vol. 221, pp. 453–483.

Ссылка на статью последних авторов в том же журнале за 1989 год в диссертации есть, а на указанную выше статью 1990 года нет.

Кроме того, говоря о ссылках на литературу, не могу не отметить, что и в обзорной части диссертации, и при обсуждении собственных результатов автора не хватает анализа существа работ предшественников. Такой анализ позволил бы подчеркнуть и аргументировать новизну подходов и результатов.

2. В первой главе достаточно подробно описаны модели течения несущего газа, ударного взаимодействия частиц с обтекаемой поверхностью, парных столкновений между частицами. Автор приводит все параметры невозмущенного потока газовой фазы, концентрацию частиц, их размер, указывает те или иные эффекты (учет или неучет столкновений между частицами, учет или неучет закрутки частиц). Однако при демонстрации и анализе численных результатов в п. 1.3 (Численное исследование динамики дисперсной фазы в ударном слое; рисунки от 1.13 до 1.29) не указаны принятые значения коэффициента трения  $f$ , коэффициента восстановления нормальной компоненты скорости при столкновениях частиц друг с другом  $e_n$ , параметры  $e_0$  и  $v_0$ , определяющие коэффициент восстановления  $e_N$  в модели отскока частиц от поверхности тела. В дальнейшем автор приводит результаты исследования влияния коэффициентов в модели столкновения частиц на динамическое воздействие примеси на поверхность тела (рис. 1.30 – рис. 1.32), из которых видно, что эти коэффициенты заметно влияют как на траектории частиц (другими словами, на картину течения дисперсной фазы), так и на динамическое и тепловое воздействие примеси на тело. Но вопрос о том, какие значения  $f$ ,  $e_n$ ,  $e_0$  и  $v_0$  и почему именно такие были приняты в сериях вычислительных экспериментов при исследовании воздействия частиц на тело и на течение несущего газа, остался открытым. Кстати, подобное замечание

можно сделать и относительно задания степени оптической черноты  $\epsilon$  поверхности частиц (стр. 38).

Неясно, учитывалась ли зависимость коэффициента восстановления  $e_N$  нормальной компоненты скорости частиц при отскоке от поверхности от угла удара. На стр. 42 приведена зависимость  $e_N$  только от  $v_N$ . Однако, как показывают экспериментальные данные различных авторов, зависимость  $e_N$  от угла удара очень сильная. Следовательно, она будет оказывать определяющее влияние на картину течения примеси и, как следствие, на исследуемые функционалы (интенсивность ударов, плотность потока энергии к поверхности тела от дисперсной фазы, среднюю скорость ударов и др.).

Завершая обсуждение вопроса о моделировании соударения частиц с поверхностью тела, обратим внимание на то, что принятая в диссертации модель (стр. 41–43) в литературе используется при умеренных скоростях удара (до 20–30 м/с). В то же время в диссертации рассматриваются в том числе высокоинерционные частицы и гиперзвуковое обтекание тел (число Маха в большинстве примеров расчета равно 6). Хотя скорость соударения частиц с телом не приводится, можно ожидать, что она будет достаточно большой (до нескольких сотен метров в секунду). При больших скоростях удара наиболее надежными в настоящее время считаются экспериментальные зависимости коэффициентов восстановления скорости частиц от скорости падения и угла удара (W. Tabakoff, В.А. Лашков, А.Л. Стасенко). Поэтому логично было бы сравнить параметры отраженных частиц, получающиеся в принятой автором модели ударного взаимодействия, с этими зависимостями. Отсутствие такого сравнения оставляет открытым вопрос об адекватности принятой модели.

**3.** Автор рассматривает широкий диапазон размеров частиц (от 2 мкм до 50 мкм). Динамическое поведение частиц в потоке определяется числом Стокса, которое представляет собой отношение длины динамической релаксации частиц к характерному линейному размеру течения. Это число в указанном диапазоне размеров частиц различается в 625 раз, т.е. почти на три порядка. К сожалению, автор не приводит значения числа Стокса в рассматриваемых примерах расчетов.

4. Для столкновительной дисперсной фазы важным параметром является число Кнудсена в "газе" частиц  $Kn_p$ . Как видно из представленных картин течения примеси (например, рис. 1.17), концентрация примеси в ударном слое изменяется очень сильно, и следует ожидать, что число Кнудсена также будет существенно изменяться. При переходе в последующих главах от реальных частиц к частицам-представителям (к моделирующим частицам) необходимо обеспечить равенство чисел Кнудсена в обоих случаях. Другими словами, необходимо обеспечить равносильность численных моделей столкновительной примеси, основанных как на прямом численном моделировании всех частиц, так и на моделировании только частиц-представителей. Автор неоднократно подчеркивает необходимость при переходе к моделирующим частицам обеспечить одинаковую интенсивность столкновений частиц (стр. 73, стр. 80). Результаты на рис. 2.7 и 2.8 показывают, что при соответствующем выборе параметров соударения моделирующих частиц распределения вдоль контура цилиндра таких важных функционалов течения, как средняя нормальная скорость частиц в момент удара и плотность потока энергии от примеси к поверхности для обеих моделей практически совпадают вплоть до  $F=16$  ( $F$  – число реальных частиц в моделирующей частице). Конечно, было бы интересно исследовать зависимость результатов от  $F$  в более широком диапазоне изменения этого параметра. Несмотря на полученное согласие, наиболее убедительным аргументом в пользу равносильности обеих моделей дисперсных сред с точки зрения столкновений между частицами могли бы быть всё же одинаковые поля числа Кнудсена  $Kn_p$  в ударном слое. К сожалению, информация о числах Кнудсена в диссертации отсутствует.

5. Не совсем понятно, почему в п. 1.4 (Численное исследование воздействия фракции частиц на преграду и течение газа в ударном слое) при объемной концентрации частиц в невозмущенном потоке  $10^{-4}$ , когда столкновения между частицами в ударном слое заведомо играют очень большую роль (показано в предыдущем п. 1.3), рассматривается течение без учета столкновений (рис. 1.33 а, б; рис. 1.34). Естественным было бы при данной концентрации исследовать варианты с обратным влиянием примеси на те-

чение газа и без обратного влияния, но с учетом столкновений между частицами.

6. Несомненный интерес представляет результат автора о наибольшем росте теплового потока в критической точке в случае турбулентного пограничного слоя именно для крупных частиц диаметра 50 мкм, а не для мелких 2 мкм (стр. 65). Этот результат противоречит опубликованному в статье [B.Oesterle, A.Volkov, Yu.Tsirkunov. Progress in Flight Physics, Vol. 5. 2013, pp. 441–456] для ламинарного пограничного слоя, где найдено, что как для столкновительной, так и для бесстолкновительной примеси наибольший тепловой поток от газовой фазы в критической точке получается при размерах частиц вблизи критического (при размерах меньше критического частицы не сталкиваются с поверхностью). К сожалению, в диссертации не приводится значение критического размера частиц при рассмотренных параметрах течения и отсутствует сравнительный анализ и обсуждение данного результата. Кроме того, дисперсная фаза влияет не только на параметры на внешней границе пограничного слоя, но и на само течение внутри пограничного слоя, поэтому принятый подход к определению плотности конвективного теплового потока от газовой фазы к поверхности тела (стр. 64–65), когда влияние частиц на течение внутри пограничного слоя не рассматривается, представляется не достаточно корректным.

7. При сравнении результатов расчетов прямым моделированием движения и столкновений частиц с результатами статистического моделирования методом Монте-Карло автор не поясняет, почему был выбран вариант метода Монте-Карло без счетчика времени, а не другой, скажем, метод мажорантной частоты, который очень хорошо зарекомендовал себя в динамике разреженного газа.

8. Результаты расчета эрозионного разрушения тела на основе концепции эффективной энтальпии разрушения (рис. 3.6 и 3.8) показывают, что имеет место хрупкое разрушение. При этом неясно, как моделировать разрушение упругопластического тела, что не менее актуально, чем разрушение хрупкого.



## Часть II

### (Моделирование взаимодействия крупных частиц с ударным слоем затупленного тела и с головной ударной волной; главы 4, 5 и 6)

Эту часть можно рассматривать как задачу взаимодействия нескольких тел в сверхзвуковой аэродинамике. Данная задача требует моделирования с высокой точностью трехмерных нестационарных течений в многосвязных областях с движущимися границами. Создание вычислительной модели и разработка технологии расчета для такого рода течений представляют значительные трудности. В то же время прямое моделирование с высоким пространственно-временным разрешением газодинамической интерференции движущихся тел актуально для многих приложений в аэрокосмической технике и других областях.

**Наиболее значимыми результатами** диссертации в этой части являются следующие:

**Первое.** Разработаны и реализованы вычислительные модели для решения уравнений Эйлера **в многосвязных областях**. Алгоритм моделирования основан на использовании **адаптивных декартовых фиксированных сеток** высокого разрешения, а также **скользящих сеток**.

**Второе.** Разработана **бессеточная** вычислительная модель для решения **уравнений Эйлера и Навье–Стокса**. Такой подход является очень гибким и при использовании анизотропного распределения узлов позволяет обеспечить высокое разрешение течения газа во всех областях, в том числе в пограничных слоях, при существенно меньших вычислительных затратах.

Да, бессеточные методы не являются консервативными, что всегда желательно, особенно при сквозном расчете течений с ударными волнами, однако неконсервативность бессеточных методов не является, на мой взгляд, критическим недостатком. В литературе известны неконсервативные методы, например с использованием кубических сплайнов, которые позволяют получить с высокой точностью решение уравнений Навье–Стокса даже в случае, когда в течении присутствуют ударные волны.

Согласен с мнением автора, что бессеточные методы пока не нашли серьезного применения в России, и в этом направлении диссертационное исследование является пионерским.

**Третье.** Выполнено тщательное численное исследование тонкой нестационарной ударно-волновой структуры течения в ударном слое при движении крупных частиц против потока. Детально описано газодинамическое взаимодействие одной, двух и трёх частиц с ударным слоем и друг с другом при движении по сложным пространственным траекториям. Автору удалось **впервые смоделировать колебательные режимы течения** в ударном слое, что ранее наблюдалось в экспериментах.

#### **Замечания по Части II (главы 4, 5 и 6).**

Нумерация замечаний продолжена.

9. Неверно сформулированы граничные условия на поверхности обтекаемого тела (для уравнений Эйлера в п. 4.1 на стр. 157 и для уравнений Навье–Стокса в п. 4.3, на стр. 177). В обоих случаях автор, помимо условий на компоненты скорости, задает производные по нормали от плотности, давления и касательной скорости. Этого не требуется для корректных постановок задач (см., например, [С.В. Валландер. Лекции по гидроаэромеханике. Учебное пособие. Л., Изд-во ЛГУ, 1978]). То же относится к граничным условиям на входной границе для уравнений Навье–Стокса (стр. 176, 196 и 251). Такого рода соотношения иногда полезно использовать в алгоритме расчета, однако при постановке краевых задач для исходных дифференциальных уравнений они не нужны.

10. При заданной невозмущенной скорости частицы (890 м/с, стр. 158), она, после входа в ударный слой будет обтекаться со сверхзвуковой скоростью (максимальная скорость звука в ударном слое в точке торможения равна примерно 540 м/с). При этом перед частицей возникнет головная ударная волна и сильно возмущенный след за ней. Ясно, что после отражения частица будет двигаться в возмущенном течении. В диссертации не представлены результаты расчета течения в ударном слое после входа частицы и при ее движении к телу. Автору следовало обсудить вопрос, насколько

ко сильно повлияют возмущения, вызванные падающей частицей, на движение отраженной.

Наряду с замечаниями по каждой из частей, необходимо сделать **общие замечания по всей диссертации.**

В тексте есть ряд опечаток и неточностей. Не указана размерность коэффициента динамической вязкости на стр. 36; не сказано, что  $J$  импульс силы, действующий на частицу в процессе соударения (стр. 39); следовало отметить, что соотношения в конце стр. 39, которые используются для замыкания уравнений импульса и момента импульса при соударении двух частиц, – это кинематические соотношения; неясно, что имеется в виду, когда автор пишет "в противном случае" в тексте на стр. 44 при обсуждении величины шага по времени. Автор использует термин "попарные столкновения" частиц в то время как общепринятым является термин "парные столкновения" (англ.: "binary collisions"). На стр. 45 автор пишет, что в невозмущенном потоке частицы распределены равномерно в пространстве, при этом неясно, они распределены детерминировано (например, в узлах сетки) или случайным образом на основе равновероятного закона. На стр. 47 автор ассоциирует плотность потока энергии от частиц к телу  $Q$  из-за неупругого соударения только с тепловым воздействием, но это лишь мажорантная оценка для плотности теплового потока, когда нет дробления частиц и эрозионного разрушения поверхности. Искусственной выглядит описанная на стр. 47–48 и позже на стр. 59–62 ситуация, когда поперечно обтекаемый цилиндр радиуса 3 см входит в пылевое облако на высоте 10 км с гиперзвуковым числом Маха равным 6. Термин "инертные частицы" (стр. 50) лучше было заменить на "инерционные частицы". Словосочетание "эволюция температуры в сечении критической точки" (текст на стр. 62 и далее и в подрисуночных подписях к рис. 1.35–1.37, 1.40, 2.6 и далее) является неудачным. Судя по смыслу, автор имеет в виду либо распределение параметров газа (температуры) вдоль критической линии тока, либо в меридиональной плоскости в осесимметричных задачах (например, п. 4.1). На рисунках 4.11, 4.19 следовало показать оси цилиндрической системы координат. Непонятно, зачем эти оси обозначаются по-разному в пределах одной главы ( $(x, y)$  в п.4.1 и  $(z, r)$  в п. 4.2).

Высказанные выше дискуссионные положения и замечания не влияют на общую **однозначно положительную оценку диссертационной работы**. Диссертация написана хорошим понятным научным языком. Автор занимается данной тематикой почти 20 лет. Все основные результаты имеют фундаментальный характер, они опубликованы и известны специалистам. Достоверность выводов по результатам выполненного исследования у меня, как эксперта, не вызывает сомнений. Разработанные вычислительные модели, алгоритмы и технологии численных расчетов могут использоваться во многих других приложениях. Особо отмечу, что их целесообразно внедрить в создаваемые национальные пакеты программ (аналогичные ANSYS) для численного моделирования двухфазных течений газа с частицами. Обращает на себя внимание перфекционизм автора при отработке вычислительных моделей, их верификации и валидации, а также при систематическом исследовании роли различных факторов и расчете тонкой структуры течений. Объем, качество и научный уровень выполненных исследований полностью соответствуют уровню докторской диссертации.

**Отмечу**, что автор сделал подробный двухчасовой доклад по своей диссертации на научном семинаре по механике жидкости, газа и плазмы в "ВОЕНМЕХЕ". В семинаре, кроме сотрудников нашего университета, приняли также участие ученые из Санкт-Петербургского политехнического университета, математико-механического факультета Санкт-Петербургского университета, Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН. В развернутой дискуссии по докладу выступили 6 докторов наук. Все поддержали диссертационную работу, хотя были высказаны и замечания.

**Автореферат правильно отражает содержание диссертации.**

### **Заключение**

Считаю, что диссертация **Способина Андрея Витальевича «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твердыми частицами»** удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно пп. 9, 10 и 11 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 N 842, ред. от 26.09.2022 "О порядке присуждения ученых степеней"), поскольку является

научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и представлены конкретные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, состоящее в разработке новых вычислительных моделей сложных двухфазных течений газа с твердыми частицами и трехмерных нестационарных течений в многосвязных областях, в существенном развитии алгоритмов и технологий расчетов таких течений, их обосновании и применении к решению актуальных задач двухфазной аэродинамики и газодинамической интерференции тел в сверхзвуковых потоках, а ее автор **Способин Андрей Витальевич** заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

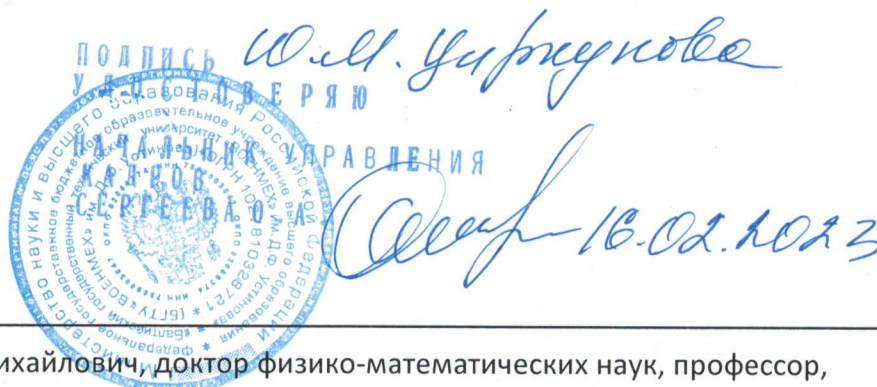
Официальный оппонент

доктор физ.-мат. наук, профессор



Ю.М. Циркунов

Подпись Ю.М. Циркунова удостоверяю:



Циркунов Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат премии Н.Е. Жуковского первой степени за 2011 год, член Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике. Место работы: кафедра плазмогазодинамики и теплотехники, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова 1-я Красноармейская ул., д. 1, 190005, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [Yury-Tsirkunov@rambler.ru](mailto:Yury-Tsirkunov@rambler.ru) моб. тел. +7 965 037 5268

С отзывом ознакомлен 20.02.2023 