

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.098.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ
МЕХАНИКИ ИМЕНИ А.Ю. ИШЛИНСКОГО РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
ФОФОНОВА ДАНИИЛА МИХАЙЛОВИЧА
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета
от 21 сентября 2023 года, протокол № 5

О присуждении Фофонову Даниилу Михайловичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка расчетно-оптимизационных методов механики жидкости, газа и плазмы для аэродинамического проектирования высокоскоростных летательных аппаратов» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 22 июня 2023 года, протокол № 4 диссертационным советом 24.1.098.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1, приказ о создании диссертационного совета № 225/нк от 14.02.2023)

Соискатель Фофонов Даниил Михайлович, 27 марта 1978 года рождения, в 2002 г. окончил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана по специальности «Динамика полета и управление движением». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2023 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук. В период подготовки диссертации Фофонов Д.М. работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) в лаборатории радиационной газовой динамики в должности научного сотрудника.

Диссертация выполнена в лаборатории радиационной газовой динамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН Суржиков Сергей Тимофеевич. Работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук в должности главного научного сотрудника.

Официальные оппоненты:

Исаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, Заведующий лабораторией фундаментальных исследований (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»),

Богданов Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории газодинамики взрыва и реагирующих систем (МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики),

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». В своем положительном заключении, подписанным проректором по науке и цифровому развитию МГТУ им. Н.Э.Баумана, д.э.н., профессором Дроговозовым П.А., указала, что разработанные методы и реализующий их авторский программный код (комплекс) позволяют выполнять аэродинамическое проектирование высокоскоростных летательных аппаратов, совершающих полет в атмосфере с использованием подъемной силы, в широком диапазоне изменения чисел Маха, Рейнольдса, углов атаки при заданной форме в плане с учетом различных конструктивных требований. К таким требованиям могут относиться габаритные размеры силовой установки, полезной нагрузки, объём фюзеляжа, крыла и пр., радиус затупления носка и передних кромок крыла и др. Результаты и выводы диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в учебном процессе системы высшего образования РФ по специальностям «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов», «Механика жидкости, газа и плазмы». Результаты диссертационной работы могут найти применение в конструкторских и

научных организациях, осуществляющих проектирование и создание новых образцов ЛА

Соискатель имеет 8 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 8 научных работ, изданных в периодических научных изданиях, сборниках материалов и тезисах докладов международных и всероссийских конференций, в том числе 8 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Фофонов Д.М. О построении оптимальной аэродинамической компоновки высокоскоростного летательного аппарата с заданной геометрией полезной нагрузки. Физ.-хим. кинетика в газовой динамике. 2021. том 22. № 6
2. Фофонов Д.М. О построении оптимальной аэродинамической компоновки высокоскоростного летательного аппарата с интегрированной силовой установкой. Физ.-хим. кинетика в газовой динамике. 2021. том 22. № 6
3. Фофонов Д.М. Оптимизация аэродинамической формы волнолета с затупленной передней кромкой. Ученые записки ЦАГИ. том 52. № 6. с. 26-29
4. Горшков А.Б., Лапыгин В.И., Михалин В.А., Сазонова Т.В., Фофонов Д.М. Обтекание треугольного крыла при минимальном тепловом потоке к его поверхности. Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 4 (83). С. 36-42.
5. Горшков А.Б., Лапыгин В.И., Михалин В.А., Сазонова Т.В., Фофонов Д.М. Использование модели идеального газа при решении задачи оптимизации формы тела в сверхзвуковом потоке. Космонавтика и ракетостроение. 2013. № 3 (72). С. 33.
6. Фофонов Д.М. Оптимизация аэродинамической компоновки гиперзвуковых летательных аппаратов. Космонавтика и ракетостроение. 2010. № 1 (58). С. 17-26.
7. Лапыгин В.И., Фофонов Д.М. Интеграция планера и силовой установки гиперзвукового летательного аппарата. Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 4 (45). С. 39-47.
8. Лапыгин В.И., Фофонов Д.М. Определение предельных значений максимального аэродинамического качества несущих тел в гиперзвуковом потоке. Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 3 (44). С. 21-27.

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке научных задач, их решении, анализе результатов и подготовке публикаций [1–8]. Им лично были созданы программы, использовавшиеся во всех численных расчетах, вошедших в диссертацию. В работе [8] представлен разработанный локальный метод расчета аэродинамических характеристик летательного аппарата в сверхзвуковом потоке совершенного газа, основанный на анализе сверхзвукового обтекания плоской пластины под углом атаки и алгоритм

оптимизации формы тела максимального аэродинамического качества или минимального сопротивления, на основе численного вариационного метода локальных вариаций. В работе [5] автором было проведено сравнение решений полученных в рамках приближенной и точной моделей для конического треугольного крыла. В работе [7] автором представлено решение задачи интеграции планера и силовой установки гиперзвукового летательного аппарата. В работах [1–3, 6], при использовании разработанного авторского программного кода, автором лично проведены дополнительные исследования применимости предлагаемых методов и представлены решения некоторых прикладных задач.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:

- К.т.н., доцента кафедры «Динамика и управление полётом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э.Баумана, Луценко А.Ю., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Отсутствуют сведения о пакете CFD, в котором производилось численное моделирование. 2. Нет сравнения с экспериментом хотя бы некоторых полученных результатов. 3. Сравнение с известными методами оптимизации и поиска оптимальных по аэродинамическим характеристикам конфигураций проведено только в рамках сравнения с решением задачи о поиске формы волнолета и с поиском аналитического решения для тонкого треугольного крыла. 4. Сходимость предложенного вариационного метода была исследована только для класса острых треугольных крыльев. 5. Аэродинамические коэффициенты, представленные в работе, обозначены не по ГОСТу.
- Д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией фундаментальных исследований научно-технического центра Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации Исаева С.А., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Концепция работы состоит в оптимизации по коэффициенту подъемной силы C_y и аэродинамическому качеству K формы высокоскоростного возвращаемого аппарата. Не понятно, почему в дополнение к указанным параметрам не рассматриваются критерии по тепловой нагрузке. Ведь оптимальная форма может меняться, в особенности боковые утончения кромок. 2. Априори неизвестная форма высокоскоростного аппарата при различных углах атаки и скольжения может иметь разнообразные режимы обтекания, как безотрывные, так и отрывные, в том числе нестационарные. В оптимизационной концепции

должны быть ограничения, которые не указаны. 3. Большое внимание в работе уделено конструированию кодов. Вполне понятно, что упрощенные модели, основанные на формуле Ньютона, например, должны быть крайне эффективными. Однако практически об эффективности кодов ничего не говорится. Кстати, интересно уяснить. 6 на 16 элементов на несущей поверхности, показанной на рис.2.5, - этого достаточно? 4. На 76 стр. в формуле (2.9) ламинарно-турбулентный переход не рассматривается. Почему? 5. Есть ряд мелких замечаний по ходу работы. В Табл. 1.2 величины аэродинамических коэффициентов представлены с тремя значащими цифрами после запятой, а в Табл. 1.3 с четырьмя. Почему и сколько знаков нужно? На стр. 39 появляется ссылка на формулу (7), которой в тексте нет. На рис. 1.21 сплошные кривые рассчитаны из решений уравнений Навье-Стокса, а пунктирные по формуле (7), а на рис. 1.22 все наоборот. Почему? Хотя согласие прогнозов по приближенной формуле и расчетов по точной модели впечатляет и служит достаточным обоснованием предположения об оценке постоянного интегрального трения. Не ясно, какова величина k для турбулентного погранслоя (стр.43). Почему-то не отмечена роль скругления кромок в создании *K max* оптимальных треугольных крыльев. А она значительная.

- к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательского института механики Богданова А.Н., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Полученный автором конечный результат представлен им весьма скромно. Понятно, что тело, претендующее на оптимальность, будет относительно тонким, понятно, что оно будет иметь гладко обтекаемую форму (если не рассматривать сложные конструкции наподобие биплана Буземана), но то, что процесс оптимизации тел различной первоначально формы приводит к одной и той же конечной картине, впечатляет весьма. 2. Используемый автором метод расчета оптимальных параметров исключает в принципе качественно иные формы тел и процессы резкой перестройки картины обтекания аппарата (гарантии, что эти пути неплодотворны, конечно же, нет), но это уже задачи качественно иного рода. 3. Можно высказать ряд мелких замечаний. Местами страдает стиль изложения (наибольшие значения максимального качества, полет с использованием подъемной силы, анализ влияния математической модели, математические средства механики жидкости, решающее значение в развитии сверхзвуковой авиации имела аэродинамика и т.д.). 4. Автором употребляется термин корреляция и понимается под этим

соответствие, не являющееся линейным, в то время как в математике корреляция характеризует именно линейность соответствия.

- К.ф.-м.н., доцента, начальника лаборатории ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского Будника А.П., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Замечаний существенных к автореферату нет. Однако, следовало бы кривые на рисунках для их распознавания снабдить номерами, так как в чёрно - белом варианте реферата невозможно определить цвета и сопоставить их с указанными номерами в подписи к рисунку. В диссертации представлены цветные рисунки и эта проблема не возникает.
- Д.ф.-м.н., заведующего лабораторией дифференциальных уравнений ИГиЛ СО РАН Чупахина А.П., который наряду с положительным отзывом сделал следующее замечание: 1. Пожалуй, основным замечанием к работе является то, что описание сравнения полученных автором результатов с известными методами оптимизации дано только в рамках решения задачи о поиске формы волнолета и аналитического решения задачи для тонкого крыла.
- Д.ф.-м.н., профессора, главного научного сотрудника ИПМ им. М.В. Келдыша РАН Елизаровой Т.Г., которая наряду с положительным отзывом сделала следующие замечания: 1. В автореферате отсутствуют сравнения полученных автором результатов с известными из литературы данными экспериментов. Такая верификация увеличила бы убедительность данных автора и уверенность в возможностях применяемых методов. 2. В качестве пожелания отмечу, что было бы полезно пояснить влияние турбулентности на полученные результаты.
- Д.ф.-м.н., профессора, начальника отдела «Теоретической газовой динамики, аэроакустики, численных методов и математического эксперимента» отделения «Газовой динамики и теплофизики» Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Крайко А.Н., который наряду с положительным отзывом сделал следующее замечание: К недостаткам автореферата, в первую очередь, следует отнести качество иллюстраций, подписей к ним и пояснений в его тексте. По этой причине автору отзыва пришлось ознакомиться со всеми процитированными в автореферате 8-ю статьями соискателя.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у официальных оппонентов и представителя ведущей организации публикаций по теме работы соискателя:

1. Исаев С.А., Баранов П.А., Леонтьев А.И., Попов И.А. Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками // Письма в Журнал технической физики. Т. 44. № 9. 2018. С. 73-80.
2. Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A., Guvernyuk S., Sinyavin A., Chulyunin A., Mazo A., Demidov D. Ensuring safe descend of reusable rocket stages – numerical simulation and experiments on subsonic turbulent air flow around a semi-circular cylinder at zero angle of attack and moderate Reynolds number // Acta Astronautica. 2018. Vol. 150. P.117-136.
3. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163 (Part A). P. 202-207.
4. Isaev S.A., Popov I.A., Sudakov A.G., Leontiev A.I., Milman O.O. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // International Journal of Heat and Mass Transfer. T. 134. 2019. С. 338-358.
5. Kong D., Afanasiev V.N., Isaev S.A., Nikushchenko D.V. Jet vortex heat transfer in turbulent air flow around a plate with a slit rib // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol.146 (118867). P. 1- 17.
6. Исаев С.А., Чулюнин А.Ю., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Анализ аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на стабилизированном участке узкого канала с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 1. С. 116-125.
7. Исаев С.А., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Тряскин Н.В., Юнаков Л.П. Трансформация отрывного турбулентного течения в конической лунке на стенке узкого канала и снижение гидравлических потерь с увеличением конусности // Письма в ЖТФ. 2021. Т.47. №11. С.21-25.
8. Исаев С.А., Мясун Дж.Дж., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Моделирование влияния сдвига ветра на снижение лобового сопротивления

энергоэффективного высотного сооружения с использованием дросселирующего эффекта // Математическое моделирование. 2021. Т. 33, № 7. С. 5-17.

9. Kong De-hai, Zhang Chang-xian, Ma Zhen-yuan, Liu Cun-liang, Isaev S.A., Guo Tao, Xie Fan. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of swirling jet on a dimpled surface with effusion holes at turbine blade leading edge, Applied Thermal Engineering 209 (2022) 118243. 15p.

10. Isaev S. , Nikushchenko D. , Sudakov A., Tryaskin N., Iunakov L., Usachov A. and Kharchenko V. Numerical simulation of heat transfer enhancement in the paths of propulsion systems with single-row spherical and oval dimples on the wall. Energies 2022, 15, 7198.

11. Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2022. №5. С.13-24.

12. Исаев С.А., Судаков А.Г., Никущенко Д.В., Чунг К. Влияние сжимаемости на уловленный вихрь в зазоре между соосными диском и цилиндром и сопротивление компоновки при осесимметричном до-, транс- и сверхзвуковом обтекании. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2022. №6. С.125-134.

13. Isaev S., Leontiev A., Gritskevich M., Nikushchenko D., Guvernuyuk S., Sudakov A., Chung K.-M., Tryaskin N., Zubin M., Sinyavin A. Development of energy efficient structured plates with zigzag arrangement of multirow inclined oval trench dimples. Int. J. Thermal Sciences 184 (2023) 107988.

14. Исаев С.А. Аэрогидродинамические механизмы интенсификации физико-энергетических процессов на структурированных энергоэффективных поверхностях с вихревыми генераторами // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30. №1. С.83-88.

15. Богданов А.Н. Ударно-волновые предвестники при прогрессии ударной волны в канализированную нагретую среду. Возможность установления режима. Инженерный журнал: наука и инновации, издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва), 2022, № 6, с. 6-7.

16. Bogdanov A.N. Mathematical Modeling of an Interactive Transonic Boundary Layer with a Nonlinear Profile of Undisturbed Speed. Doklady Physics, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), 2021, том 66, № 11, с. 316-319.

17. Богданов А.Н. К математическому моделированию взаимодействующего трансзвукового пограничного слоя с нелинейным профилем невозмущенной скорости. Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, издательство Российская академия наук (Москва), 2021, том 501, № 1, с. 29-32.
18. Bogdanov A.N. Dynamics of Shock Waves in Media with Longitudinal Stratification. Doklady Physics, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), 2020, том 65, № 3, с. 83-84.
19. Богданов А.Н. Динамика ударных волн в средах с продольной стратификацией. Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, издательство Российская академия наук (Москва), 2020, том 491, № 1, с. 5-6.
20. Богданов А.Н. To The Mathematical Modeling of Nonstationary Transonic Flows. Analytical Approach. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, издательство - (Krakow), 2019, том 477, № 1, с. 1-3.
21. Bogdanov A.N., Diesperov V.N., Zhuk V.I. Nonclassical Transonic Boundary Layers: Toward Overcoming Dead-End Situations in High-Speed Aerodynamics. Computational Mathematics and Mathematical Physics, издательство Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), 2018, том 58, № 2, с. 254-263.
22. Богданов А.Н., Диесперов В.Н., Жук В.И. Неклассические трансзвуковые пограничные слои. К преодолению некоторых тупиковых ситуаций в аэродинамике больших скоростей. Журнал вычислительной математики и математической физики, издательство ФГБУ "Издательство «Наука» (Москва), 2018, том 58, № 2, с. 270-280
23. Горский В.В., Бродский М.Ю. Алгоритм газодинамического расчета асимметричных конусов методом локальных клиньев и конусов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2023, № 1 (144), с. 22–37.
24. Зарубин В.С., Зимин В.Н., Леонов В.В. и др. Оценки равновесной температуры на поверхности сферического затупления спускаемого орбитального аппарата. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2022, № 4 (143), с. 44–59.
25. Алиев А.А., Зимин В.Н., Товстоног В.А. и др. Сравнительная оценка теплового состояния клина с термостойким покрытием в высокоскоростном

воздушном потоке. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2022, № 1 (140), с. 4–23.

26. Алиев А.А., Бурков А.С., Товстоног В.А. и др. Тепловое состояние аэродинамического профиля летательного аппарата, обтекаемого высокоскоростным потоком воздуха. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2021, № 3 (138), с. 4–24.

27. Товстоног В.А., Томак В.И., Бурков А.С. Оценка температурного состояния и методические вопросы газодинамических испытаний образцов высокотемпературной керамики. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2020, № 6 (135), с. 45–65.

28. Косенкова А.В., Миненко В.Е., Агафонов Д.Н. Исследование баллистического режима спуска маневренного посадочного аппарата на поверхность Венеры. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2020, № 4 (133), с. 42–60.

29. Горский В.В., Локтионова А.Г. Модифицированная алгебраическая модель турбулентной вязкости Себечи – Смита для всей поверхности затупленного конуса. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2020, № 4 (133), с. 28–41.

30. Товстоног В.А. Сравнительная оценка теплозащитных характеристик металлических и керамических экранов проточных трактов высокотемпературных газодинамических установок. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2020, № 2 (133), с. 52–75.

31. Зинин К.М., Алиев А.А., Товстоног В.А. Оценка теплового состояния затупленного клина в высокоскоростном газовом потоке. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2019, № 3, с. 29–40.

32. Федоров С.В., Велданов В.А., Федорова Н.А. О возможности увеличения глубины проникания в грунтово-скальные преграды составных ударников с отстреливаемой в процессе взаимодействия хвостовой частью. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2019, № 1, с. 30–50.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан приближенный метод расчета аэродинамических характеристик тел с кусочно-гладкой и априори неизвестной поверхностью при больших сверхзвуковых скоростях для применения в процедуре численной оптимизации. Выполнен анализ точности предложенного метода

расчета аэродинамических характеристик высокоскоростных летательных аппаратов. На основе численного метода локальных вариаций разработаны алгоритмы оптимизации формы тела с целью достижения максимального аэродинамического качества или минимального коэффициента сопротивления при задании числа Маха, коэффициента трения, угла атаки, а также различных объемных и геометрических ограничений на его форму. Решена вариационная задача о форме тела максимального аэродинамического качества в сверхзвуковом потоке в рамках локальной модели взаимодействия сверхзвукового потока с поверхностью тела. Создан авторский программный код (комплекс программ), реализующий разработанные алгоритмы оптимизации. Разработан метод аэродинамического проектирования высокоскоростных летательных аппаратов. Представлены результаты аэродинамического проектирования интегральной компоновки планера и силовой установки летательного аппарата; аэродинамической компоновки летательного аппарата при заданных форме и габаритах отсеков размещения оборудования и полезной нагрузки. Разработан численный расчетно-оптимизационный метод аэродинамики для проектирования высокоскоростных летательных аппаратов, совершающих полет в атмосфере с использованием подъемной силы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

проведен анализ работоспособности локальной модели взаимодействия тела с набегающим потоком при расчете аэродинамических характеристик летательного аппарата, совершающих полет в атмосфере с использованием подъемной силы при больших сверхзвуковых скоростях. Проведен анализ точности и сходимости разработанных алгоритмов оптимизации, сравнение результатов численной оптимизации с известными решениями об оптимальной форме тела, а также с точным решением вариационной задачи. Решение задачи оптимизации выполнено с использованием различных математических моделей взаимодействия тела с набегающим потоком. Проведен сравнительный анализ решений, полученных с использованием различных математических моделей.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что:

разработанный авторский программный код (комплекс программ) позволяет выполнять аэродинамическое проектирование высокоскоростных летательных аппаратов, совершающих полет в атмосфере с использованием подъемной силы, в широком диапазоне изменения чисел Маха, Рейнольдса,

углов атаки при заданной форме в плане с учетом различных конструктивных требований. К таким требованиям могут относиться габаритные размеры силовой установки, полезной нагрузки, объём фюзеляжа, крыла, радиус закругления носка и передних кромок крыла и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

результаты диссертации подтверждаются физической обоснованностью постановок задач и строгим аналитическим характером их рассмотрения с применением современных теоретических концепций и математических средств механики жидкости, газа и плазмы, сравнением собственных численных результатов с расчетами других авторов, а также соответствием численных и аналитических решений.

Личный вклад соискателя состоит в том, что:

автором был разработан уточненный метод касательного клина, произведена конкретизация алгоритма метода локальных вариаций для решения аэродинамических задач, создано программное обеспечение, проведены расчёты, осуществлен их анализ и обобщение.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания и заданы следующие вопросы: в работе не указаны размерности некоторых параметров, применено нестандартное обозначение координат; задан вопрос о результатах сравнения предложенного метода с ранее известными, вопрос об отличиях этих результатов; вопрос о предложенных улучшениях по сравнению с известными работами; вопрос о вкладе трения в сопротивление; вопрос, была ли предложена хотя бы одна оптимальная конфигурация, которая не была известна ранее; вопрос об уточненном способе расчета распределения давления по поверхности спускаемого аппарата.

Соискатель Фофонов Д.М. ответил по существу на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, дал пояснения о размерностях и выборе системы координат, ответил на вопросы о сравнении с известными методами оптимизации и предложенных улучшениях; ответил на вопрос о вкладе трения в сопротивление, сообщил о полученных новых, ранее не известных результатах; сообщил, из каких источников было получено распределение давления по поверхности спускаемого аппарата, сообщил, что ссылка на данный материал есть в диссертации.

На заседании 21.09.2023 **Диссертационный совет принял решение** за существенный вклад в разработку расчетно-оптимизационных методов проектирования высокоскоростных летательных аппаратов, разработку алгоритма, позволяющего определять оптимальные аэродинамические

характеристики и применимого для аппаратов сложной формы, получение новых результатов, имеющих не только научное, но и практическое значение, **присудить Фофонову Даниилу Михайловичу** учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета
24.1.098.01 при ИПМех РАН,
академик РАН



Климов Д.М.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.098.01 при ИПМех РАН
к.ф.-м.н.



Сысоева Е.Я.

22 сентября 2023 г.