



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574  
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,  
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,  
г. Санкт-Петербург, 195251  
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Ученому секретарю диссертационного  
совета 31.01006.01,  
на базе ФАУ «ЦАГИ»,  
доктору физико-математических наук  
М.А. Брутяну

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, доцента Гарбарука Андрея Викторовича на диссертационную работу Сергея Бахнэ «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью развития и верификации современных вихреразрешающих методов (LES/IDDES) для моделирования сложных турбулентных течений, в том числе и при наличии горения, поскольку точность подхода RANS во многих случаях не является удовлетворительной. Работа посвящена решению весьма сложной задачи, характеризующейся наличием различных сложных физических явлений, моделирование каждого из которых является самостоятельной сложной задачей. К ним относятся сверхзвуковое течение в канале, взаимодействие скачка уплотнения с пограничным слоем, вторичные токи во внутренних углах, инжекция струи в сверхзвуковой поток, горение водородной струи и т.д. Моделирование осложняется малым количеством известных экспериментов и неполнотой измеренных экспериментальных данных. Для исследования применимости тех или иных подходов для моделирования подобных сложных течений необходимо провести систематическую и

кропотливую работу по исследованию влияния различных физических и вычислительных параметров модели на решение. Именно такое исследование представлено в диссертации. В частности, в работе проведено большое исследование по выбору и модификации численной схемы, а также для используемого кода выполнена калибровка констант подсеточной модели SST-IDDES на основе задачи о распаде изотропной турбулентности. Значимость разработанного метода подтверждается его применением для решения актуальной задачи о горении поперечных струй водорода в горячем сверхзвуковом потоке. Проведено исследование влияния различных физических факторов на результаты расчета, а также предложен механизм стабилизации пламени, что имеет прямое значение для проектирования двигателей, где ключевую роль играет точное предсказание зон тепловыделения и тепловых потоков.

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации - 201 страница. В тексте имеется 107 рисунков и 13 таблиц. Список источников содержит 227 работ.

**Во введении** указаны актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи работы, определены методы исследования, отмечена научная новизна, обоснованы достоверность и теоретическая значимость результатов. Кроме того, автором выделены положения, выносимые на защиту, перечислены сделанные доклады на конференциях по теме диссертации.

**Первая глава** по сути является обзором литературы; в ней дается обоснование выбора использованных подходов. В частности, в разделе 1.1 констатируются недостатки метода RANS для детального описания рассматриваемого течения и обосновывается выбор гибридного подхода RANS-LES (IDDES). В разделе 1.4 рассмотрены специфические проблемы моделирования в прямоугольных каналах (вторичные течения, угловые отрывы), что напрямую касается рассматриваемой задачи, что позволило выбрать оптимальные подходы к ее решению.

**Вторая глава** является методологической и по большей части посвящена выбору численной схемы. Автор начинает с анализа схем высокого порядка семейства WENO на одномерных тестах (2.2). Дальнейший выбор схемы и калибровки констант для трехмерного случая проведен на задаче распада изотропной турбулентности (2.3). Проверка выбранного алгоритма на слое смешения (2.4) и, что критически важно, на отрыве из-под скачка уплотнения (2.5) демонстрирует, что выбранный гибридный метод WENO5+CD2 с моделью SST-IDDES устойчив и обладает приемлемой точностью как для свободных турбулентных течений, так и для пристенных течений с ударными волнами.

**Третья глава**, является основной и посвящена задаче горения водородной струи в сверхзвуковом потоке. В разделе 3.1 приведена постановка задачи, включающая и выбор кинетических моделей, и описание адаптивно-неявной схемы (AIS). Раздел 3.2 посвящен разработке специализированных граничных условий, учитывающих шероховатость стенок и позволяющих экономично описать струю за счет поверхностного источника массы. Проведены параметрические расчеты (разделы 3.4-3.6) по выявлению влияния температуры стенки, шероховатости и наличие окон на решение. Здесь же предложен механизм стабилизации горения.

**В заключении** обобщаются основные результаты работы.

**Новизна работы** заключается в том, что разработан и подвергнут комплексной верификации подход на основе метода IDDES для моделирования горения поперечных струй водорода в сверхзвуковом потоке, включая калибровку констант модели и анализ влияния различных факторов (шероховатость стенок, тепловое взаимодействие, вторичные течения) на стабилизацию пламени. Впервые предложен механизм стабилизации горения в эксперименте ONERA, связанный с нестационарным взаимодействием скачков уплотнения и отрывных зон.

**Теоретическую значимость** имеет разработка верифицированной методики выбора и калибровки численных схем (WENO5+CD2) и констант модели IDDES для задач горения, включая оригинальные подходы к согласованию начальных полей турбулентности, и модификации граничных условий. Также на основе IDDES-расчета предложен механизм стабилизации высокоскоростного горения в расширяющемся канале с поперечной подачей топлива, описание которого невозможно с использованием метода RANS.

**Практическую значимость** имеет созданный инструментарий для прогнозирования нестационарных процессов в камерах сгорания, позволяющий оптимизировать параметры поперечной инжекции топлива и минимизировать риски возникновения нерасчетных режимов работы. Методика внедрена в научный расчётный модуль zFlare, используемый в ЦАГИ.

Основные положения, результаты и выводы диссертации являются **хорошо обоснованными** текстом диссертации. Их **достоверность** обоснована тестовыми расчетами, сравнением с расчетами других авторов и с экспериментом. Содержание диссертации полностью соответствует цели работы и сформулированным задачам.

Содержание диссертации было рассмотрено на семинаре ВШПМиВФ ФизМех СПбПУ Петра Великого. Доклад автора продемонстрировал его весомый **личный вклад** в данную работу и получил положительную оценку.

По диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Исследование влияния столь большого числа физических и численных параметров требует методичности и аккуратности, граничащих с педантизмом, не только при проведении исследований, но и при их изложении. Мне кажется, в настоящей работе в этом направлении есть еще место для совершенствования. Это касается не только изложения внутри разделов, но и распределения информации по разделам. В частности, некоторые разделы глав 2 и 3 более уместно смотрелись бы в обзорной главе. Например, раздел 2.2.2 по сути является обзором

модификаций схемы WENO, но помещен в описание используемого автором метода. Глава 3 начинается описанием эксперимента ONERA и соответствующих ему расчетов, кажется, что эта информация будет более уместна в разделе 1.3. А в разделе 1.3 хочется сократить описание экспериментов, не использовавшихся в настоящем исследовании. Также непонятно, почему при наличии Главы 2, посвященной численному методу, описание метода решения задачи с химическими реакциями приводится в разделе 3.1.1.

2. Часть важной информации не приведена или приводится после того, как используется. Например, практически не приведена информация о кинетике химических реакций, скудная информация появляется лишь на 148 странице. Метод Хойна используется во второй главе, а описывается только в третьей.
3. Не всегда понятна логика выбора параметров расчета: модели, численной схемы, использования STG. Например, в разделе 2.2.4. показано, что схемы WENO-ZM5 и WENO-SYMB006 превосходят схему WENO5, однако для построения гибридной схемы используется именно WENO5, а не ее улучшенные версии.
4. Расчеты в разделах 3.4 и 3.5 приведены «исторически», что затрудняет восприятие.
5. При расчете сверхзвуковых течений с большими числами Маха иногда возникают вычислительные неустойчивости, называемые «carbuncle instability». Наблюдались ли такие проблемы в проводимых расчетах?
6. В разделе 2.2.3 не указан вес центральных разностей в использовавшейся гибридной схеме.
7. На рис.50 имело смысл добавить линию закона стенки для сжимаемых течений.
8. В разделе 2.5 приведено сравнение результатов IDDES и ILES. По этому разделу имеется ряд вопросов. Какая схема использовалась в IDDES расчете? Приведенное на рис. 52 падение коэффициента трения до скачка

свидетельствует о слишком диссипативной схеме. Используемые сетки построены для WMLES. При проведении ILES расчетов сетка должна удовлетворять другим критерия (в переменных закона стенки).

9. В практике распространен подход локального повышения веса противопоточной схемы в рамках гибридной в областях больших градиентов для повышения ее устойчивости. Это позволяет заметно снизить вес противопоточной схемы в остальной области и, следовательно, уменьшить диссипативные свойства схемы. Пробовался ли такой подход?
10. Каков был продольный шаг сетки в сопле Лаваля по сравнению с радиусом кривизны в критическом сечении?
11. В таблице 5 данные кажутся противоречивыми. Коэффициент трения связан с динамической скоростью и, как следствие, их погрешности также связаны. Кажется, что погрешность коэффициента трения должна быть примерно в 2 раза больше погрешности динамической скорости, но в таблице 5 различия существенно больше.
12. В работе, как и в любой другой диссертации, имеется некоторое количество ошибок, опечаток и жаргонных выражений

Диссертационная работа Сергея Бахнэ на тему «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES» представляет собой самостоятельное, цельное и завершённое научное исследование. Решенная автором задача о горении при поперечной инжекции топлива в сверхзвуковой поток имеет важное значение для газовой динамики турбулентных течений с горением в каналах. В работе приведён детальный анализ влияния ключевых физических факторов (шероховатости стенок, теплообмена, уровня турбулентности на входе) на структуру течения и процесс стабилизации пламени. В рамках проведённого исследования автор впервые продемонстрировал, что стабилизация пламени в эксперименте ONERA носит динамический характер и обусловлена сложным волновым и вихревым взаимодействием. Полученные результаты имеют важное теоретическое и

практическое значение. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы». Положения диссертации, выносимые на защиту, отражены в 12 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК (согласно автореферату, всего автором опубликовано в таких изданиях 14 статей по тематике диссертации). Предложенные автором методики были успешно апробированы на ряде научно-практических конференций. Автореферат полностью отражает содержание и основные результаты диссертационного исследования.

Диссертационная работа Сергея Бахнэ соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 в ред. от 25.01.2024), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Автор работы, Сергей Бахнэ, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,  
профессор ВШПМиВФ,  
г.н.с. лаборатории ВГАиТ,  
д.ф.-м.н., доцент

Адрес: г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,  
ул. Политехническая, д.29, литера Б, СПбПУ Петра Великого  
тел.: +7-921-909-10-84, e-mail: [agarbaruk@cfд.spbstu.ru](mailto:agarbaruk@cfд.spbstu.ru)

Подпись профессора Андрея Викторовича Гарбарука заверяю

*Наталия Олена*  
(должность)  
по работе с персоналом  
Дата 02.10.2025



*Рогенко К.Н.*  
(Ф.И.О.)



**Минобрнауки России**  
**Федеральное государственное учреждение**  
**«Федеральный исследовательский центр**  
**Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша**  
**Российской академии наук»**  
**(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)**

125047, Москва, Миусская пл., 4 Тел. 8 (499) 220-72-33 Факс 8 (499) 972-07-37  
<http://keldysh.ru> e-mail: [office@keldysh.ru](mailto:office@keldysh.ru)  
ОКПО 02699381 ОГРН 1037739115787 ИНН/КПП 7710063939/771001001

02.10.2025 № 11103- 9422/787-1

На № \_\_\_\_\_

Ученому секретарю  
диссертационного совета 31.1.006.01 на  
базе ФАУ «ЦАГИ»,  
доктору физико-математических наук,  
доценту Брутяну М.А.

### ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Жукова Виктора Тимофеевича на диссертационную работу Бахнэ Сергея «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Рецензируемая диссертационная работа направлена на решение научно-технической проблемы, которая заключается в разработке отвечающего современным требованиям вычислительной методики, предназначенной для моделирования процессов горения в высокоскоростных потоках воздуха. Математическое моделирование таких процессов позволяет оптимизировать работу двигательных установок и повышает степень понимания физико-химических процессов горения, что необходимо для создания принципиально новых энергетических систем, например, в сфере авиационных и аэрокосмических двигателей. Поставленная цель соответствует Энергетической стратегии России до 2035 г.

#### 1. Актуальность избранной темы диссертации

Актуальность исследования связана с фундаментальной научной проблемой моделирования горения в высокоскоростном потоке с учетом управления интенсивностью теплообмена. Процессы воспламенения и горения в турбулентном сверхзвуковом потоке существенно зависят от ряда физических процессов и их взаимодействия: диффузионного перемешивания, в частности, смешения топлива с воздухом за счет турбулентной и молекулярной диффузии, конвективного переноса, теплопроводности и сопряженного теплообмена газового потока с твердыми стенками, скорости химических реакций и т.п. В работе впервые на основе вихреразрешающего моделирования (IDDES) построена математическая методика исследования механизма стабилизации пламени в эксперименте ONERA. Автор продемонстрировал адекватность применения вихреразрешающего моделирования к рассматриваемому классу течений с горением. Механизм стабилизации пламени связан с нестационарным взаимодействием ударно-волновых структур, отрывных зон и зон тепловыделения, но в диссертации также уделено внимание исследованию влияния

тонких физических факторов: шероховатости стенок, их температуры, вторичных токов в прямоугольном канале и уровня входной турбулентности. Показано, что прогрев стенок является одним из ключевых факторов, определяющим режим течения. Полученные результаты не только углубляют понимание физики турбулентного горения, но и предоставляют ценные данные для валидации расчетных методов, используемых при проектировании двигателей, где проблема тепловых нагрузок и устойчивого горения стоит крайне остро.

Диссертация впечатляет объемом выполненных исследований и методическими результатами. Работа соответствует паспорту специальности 1.1.9 – есть метод, код, тестирование на большом числе задач, почти рекордные расчеты, 100-миллионные сетки для сложной системы определяющих уравнений с химкинетикой. По уровню диссертация значительно выше многих научно-квалификационных работ. К ней нет критических замечаний отрицательного характера.

## **2. Анализ содержания работы.**

Диссертационная работа написана по традиционному плану, изложена на 201 странице, состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы (227 наим.), включает 107 рисунков и 13 таблиц. Каждая глава диссертации является завершенным исследованием, обусловленным общим предметом диссертационного исследования.

**Во Введении** показана актуальность, степень разработанности темы, поставлены цели и задачи работы. Присутствуют положения, выносимые на защиту, а также отмечены выступления на конференциях по теме диссертации. Показано, что тематика исследования соответствует паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

**В первой главе** приведен обзор литературы, который структурирован вокруг центральной проблемы — стабилизации горения. В разделах главы представлена классификация способов стабилизации (вихрегенераторы, полости, ступеньки, плазменные методы), проведен критический разбор экспериментальных баз данных. Автором дана оценка их с точки зрения полноты данных, необходимых для валидации математических моделей. Автор показывает глубокое понимание того, что сравнение с экспериментом должно учитывать не только отдельные характеристики течения типа распределения давления на стенках, но и поля концентраций, тепловые потоки и данные о внутренней структуре течения.

**Во второй главе** автор детально излагает новую численную методику, объясняет, как артефакты численной схемы отделить от физических явлений. В частности, контроль явлений на отрыве из-под скачка (раздел 2.5) особенно важен, так как именно такая структура течения является ключевой для стабилизации пламени в исследуемой модели. Приведенные результаты по взаимодействию скачков и отрывных зон выглядят надежными.

**Третья глава** обладает наибольшим интересом с точки зрения установления взаимосвязи газодинамических явлений, которая в рассматриваемой области пока еще далеко не понята. Благодаря компьютерному моделированию автор исследовал ряд явлений: влияния температуры стенки, ее шероховатости, турбулентности на входе на моделируемые процессы. Установление механизма стабилизации пламени через нестационарное взаимодействие скачков, отрывных зон и тепловыделения качественно согласуется с экспериментом.

**В заключении** обобщаются основные результаты работы.

Работа хорошо структурирована; последовательность изложения материала создает целостное представление о развитии теории, методов и личного вклада соискателя.

Распределение материала по главам выглядит вполне соразмерным. Работа содержит подробный обзор литературы по теме исследования, обоснованную научную постановку, практическую цель, включает описание новых разработок. Научная проблема, поставленная и решенная в диссертации, лежит на важном направлении развития математического моделирования (что соответствует паспорту специальности 1.1.9).

Список литературы оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011 и показывает, что автор хорошо осведомлен об исследованиях по тематике диссертации. Содержание и основные результаты диссертации достаточно полно представлены в автореферате. Автор имеет 14 публикаций по тематике диссертации, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК.

### **3. Новизна исследования**

Автором предложены: модифицированная модель шероховатости стенки; специализированное граничное условие "инжектор", адекватно описывающее процесс поперечного вдува водорода в сверхзвуковой поток; методика выбора численного метода на основе задач распада изотропной турбулентности и эволюции турбулентного слоя смешения. Разработанный подход позволил впервые предложить физически обоснованный сложный механизм стабилизации горения, связанный с взаимодействием скачков уплотнения и отрывных зон в условиях поперечной инжекции.

### **4. Значимость полученных результатов для науки и практики**

Теоретическая значимость работы заключается в том, что предложено модифицированное граничное условие для шероховатых стенок с теплообменом, которое позволяет адекватно описать взаимовлияние турбулентного переноса, химических реакций и теплопередачи в условиях высокоскоростного потока. В работе дана количественная оценка вклада различных физических факторов в рассматриваемом течении.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный метод позволяет прогнозировать тепловые нагрузки на элементы конструкций камер сгорания с учетом реальной шероховатости поверхностей, что критически важно для проектирования систем охлаждения перспективных двигательных установок. Результаты применимы для оптимизации тепловых режимов работы энергетических установок.

### **5. Обоснованность и достоверность основных положений, результатов и выводов диссертации**

В заключении диссертации сделано 3 ключевых вывода, которые последовательно обобщают полученные результаты:

Вывод 1 обоснованно утверждает, что разработана «методика выбора пространственно-временных аппроксимаций и настройки констант подсеточной модели для гибридного вихреразрешающего метода, позволяющая достичь максимальной вычислительной эффективности на квазиравномерной сетке». Подтверждение находится в тексте диссертации (разделы 2.2–2.5).

Вывод 2 гласит, что «установлено количественное влияние различных физических факторов на структуру течения: шероховатость и температура стенок существенно изменяют распределение давления ( $>6\%$ ), а нелинейная модель турбулентных напряжений и генерация синтетической турбулентности значительно меняют структуру отрывных зон и ударно-

волновую картину». Подтверждение обоснованности указанного вывода находится в тексте диссертации (разделы 3.4–3.7).

Вывод 3 гласит, что «выявлен нестационарный механизм стабилизации горения, обусловленный циклическим процессом: самовоспламенение в пограничном слое → утолщение ПС и запираание канала → смещение ударно-волновой структуры → прекращение горения → повторное самовоспламенение». Подтверждение находится в тексте диссертации (раздел 3.8).

Таким образом, можно сделать заключение о том, что основные положения, результаты и выводы диссертации являются обоснованными и достоверными.

### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Основное замечание на перспективу: сильное влияние на структуру течения оказывает не только шероховатость, но и теплообмен на стенках, т.е. нужно решать задачу сопряженного теплообмена газа и твердого тела. По нашему опыту подключение такой опции даже к более простой модели многокомпонентных течений требует серьезной разработки и доступа к значительным суперкомпьютерным ресурсам.

2. Использование в названии диссертации сокращения IDDES является неоправданным, в названии следует избегать необоснованных аббревиатур.

3. В работе нет систематизированных данных о вычислительных затратах, нет оценки вычислительной сложности алгоритма (например, в виде зависимости вычислительных затрат от параметров сеточной модели). Отдельные упоминания по тексту диссертации есть («использовалось 3000 процессорных ядер. Полный объем памяти для расчёта составил 830 Гбайт. Расчёт потребовал 2.2 миллиона ядро-часов процессорного времени»). Но не сказано, какая использовалась технология – MPI, OpenMP, какая параллельная эффективность достигнута. Такого рода опыт важен и информация такая важна.

Данные замечания не затрагивают основного содержания работы и не влияют на общую положительную оценку.

### **6. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней**

Диссертация Бахнэ Сергея «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES» является самостоятельной законченной научно-исследовательской работой, которая обладает внутренним единством и показывает высокую квалификацию автора по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Обоснованность и достоверность выводов, основных научных положений и практических рекомендаций диссертации не вызывает сомнений. В работе с использованием вихреразрешающего подхода решена задача о горении при поперечной инжекции топлива в сверхзвуковой поток, которая важна для газодинамики высокоскоростных течений с горением. При этом автором впервые показано, что корректное моделирование таких течений требует совместного учета шероховатости, теплообмена и разрешенной турбулентности на входе в канал для воспроизведения экспериментальных данных. Эти выводы важны для развития методов численного моделирования в данном классе задач.

В диссертации сделан крупный шаг по приближению расчетной математической модели к реальному сложному процессу. Полученные результаты имеют существенное значение для развития научных исследований и практического применения, они могут быть использованы в организациях Российской Академии Наук, в научных организациях авиапрома России и др.

По объему полученных данных, новизне поставленных и решенных задач, научному и практическому значению полученных результатов, диссертационная работа Бахнэ Сергея соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842 (ред. от 25.01.2024)), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Бахнэ Сергей заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, и.о. заведующего отделом «Прикладные задачи механики сплошных сред» ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Жуков Виктор Тимофеевич

 подпись

«01» октября 2025г.

Контактные данные: тел.: 7(499)220-79-43, e-mail: zhukov@kiam.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 05.13.08 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Адрес места работы:

Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Телефон: +7 499 978-13-14, факс: +7 499 972-07-37, электронная почта: [office@keldysh.ru](mailto:office@keldysh.ru),

Сайт организации: <https://www.keldysh.ru/>

Подпись Виктора Тимофеевича Жукова заверяю

Учёный секретарь ИПМ им. М. В. Келдыша РАН,

кандидат физ.-мат. наук

«02» октября 2025г.



/А.А. Давыдов/