

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 29.01.2026 № 1

О присуждении **Рублеву Георгию Дмитриевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численный метод CSPH с корректировкой градиента сглаживающего ядра и его применение в механике деформируемых сред» по специальности 1.2.2. — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 30 октября 2025 года (протокол заседания № 8/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Рублев Георгий Дмитриевич**, 9 декабря 1997 года рождения, в 2021 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «Физика» по направлению «Математическая физика» с присвоением квалификации «магистр». В 2025 году соискатель окончил аспирантуру ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова». Соискатель работает в должности научного сотрудника в отделе математического моделирования ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» (предприятие госкорпорации Росатом).

Диссертация выполнена в ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова».

**Научный руководитель** - кандидат физико-математических наук, **Дьячков Сергей Александрович**, начальник отдела математического моделирования ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»

### **Официальные оппоненты:**

**Шаргатов Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов института лазерных и плазменных технологий Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,

**Стояновская Ольга Петровна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории биомеханики и многомасштабной механики сложных сред федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина»**, г. Снежинск в своем **положительном** отзыве, подписанном Брагиным А.А., доктором физико-математических наук, НТО-2 РФЯЦ-ВНИИТФ и Боковым Д.Н., кандидатом физико-математических наук, НТО-2 РФЯЦ-ВНИИТФ и утвержденном директором РФЯЦ-ВНИИТФ, кандидатом экономических наук Железновым М. Е. указала, что метод CSPH позволяет избежать проблем с искажением сетки при моделировании процессов с большими деформациями.

Актуальность обусловлена следующими факторами:

- метод CSPH позволяет избежать проблем с искажением сетки при моделировании процессов с большими деформациями;
- необходимость решения задач, которые или недоступны для стандартного метода CSPH или требуют большей точности: моделирование поверхностных явлений, исследование вязких течений, анализ взрывов в атмосфере, изучение взаимодействия ударных волн с препятствиям;
- оптимизация вычислительных затрат — важная задача, которую в ряде случаев удаётся решить за счёт моделирования в осесимметричной постановке.

Научная новизна работы соискателя включает теоретический анализ свойств схемы CSPH, формулу для оценки коэффициента схемной динамической сдвиговой вязкости, процедуру корректировки градиента сглаживающего ядра, разработанное семейство осесимметричных схем CSPH, алгоритм учета внешнего давления и поверхностного натяжения.

Практическая значимость работы заключается в расширении области применения метода CSPH, снижении схемной вязкости до незначительного относительно физической вязкости уровня, повышении точности аппроксимации пространственных производных и внедрении разработанных соискателем методов в программный комплекс РупНИА. Подробное описание предложенных методов и алгоритмов позволяет внедрить их в другие программные комплексы, расширив их функциональность и отказоустойчивость.

В диссертации представлены значительные научные достижения, которые вносят важный вклад в развитие контактных методов SPH. Диссертация **Г.Д. Рублева** соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 8 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 4 работы, из них в рецензируемых научных изданиях - 4 работы, в том числе одна работа без соавторов. Публикации по теме диссертации:

1. A.N. Parshikov, S.A. Medin, **G.D. Rublev**, S.A. Dyachkov. Numerical viscosity control in Godunov-like smoothed particle hydrodynamics for realistic flows modeling. *Physics of fluids*. Vol. 36. No. 1. 2024. DOI: 10.1063/5.0181276 (Q1, Scopus, Web of Science)

2. **G.D. Rublev**, A.N. Parshikov, S.A. Dyachkov. Improving approximation accuracy in Godunov-type smoothed particle hydrodynamics methods. *Applied Mathematics and Computation*. Vol. 488. P. 129128. 2025. DOI: 10.1016/j.amc.2024.129128 (Q1, Scopus, Web of Science)

3. **Рублев Г.Д.**, Мурзов С.А. Моделирование прохождения ударной волны через пористую медь с помощью метода подвижного окна для сглаженных частиц с корректировкой градиента сглаживающего ядра // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: математическое моделирование физических процессов.* — 2025. - № 1. — С. 51-69. DOI: 10.53403/24140171\_2025\_1\_51 (Список ВАК)

4. **G.D. Rublev**. Surface Tension Modeling using the Axisymmetric Contact Smoothed Particle Hydrodynamics Method. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. P. e19518. 2025. DOI: 10.22055/jacm.2025.48645.5390 (Q2, Scopus, Web of Science)

В работе [1] содержатся результаты, полученные с помощью реализованного соискателем в программном комплексе РупНИА решателя CSPH с вязкостью. Соискателем

проведено моделирование различных вязких течений и выполнено сравнение результатов с известными аналитическими решениями.

В работах [2-3] соискателем предложена корректировка градиента сглаживающего ядра для контактных методов CSPH (Total Kernel Correction, ТКС) и приведены верификационные расчёты, демонстрирующие преимущества такого подхода.

В работе [4] соискателем предложена численная модель поверхностного натяжения для метода CSPH, основанная на взаимодействии граничных частиц с фиктивными частицами. Кроме того, в этой же работе соискателем впервые получено семейство осесимметричных CSPH-схем, которые разработаны для минимизации изменения полного импульса и полной энергии при моделировании замкнутых систем в осесимметричной постановке. В этой работе автор привёл результаты осесимметричного моделирования малых колебаний капли, стягивания тонких плёнок и развития неустойчивости Рэля-Плато. Результаты моделирования показывают высокую точность предложенных подходов.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационной работы. Сведения об опубликованных соискателем работах, приведенные в диссертации, достоверны.

На диссертацию поступили отзывы ведущей организации и оппонентов, а также 2 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. В отзывах содержатся следующие комментарии и замечания:

*В отзыве ведущей организации РФЯЦ-ВНИИТФ:*

Замечания по тексту диссертации:

1) В тексте работы присутствуют орфографические и пунктуационные ошибки, в тексте не везде выдержано курсивное и прямое начертание в математических обозначениях,

2) Присутствуют опечатки в формулах,

3) Предложенный в разделе 2.3 «Корректировка градиента сглаживающего ядра в методе CSPH» не до конца исследован,

4) Постановки тестовых расчётов описаны неполно,

5) Исторически принятое А.Н. Паршиковым и его коллегами сокращение CSPH, от слова Contact, совпадает с другим широко используемым сокращением — Corrected SPH. Возможно, имеет смысл использовать сокращение GSPH, (от имени Godunov).

*В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Шаргатова В.А.:*

В отзыве отмечается, что предложенные соискателем улучшения контактного метода SPH, разработанного А.Н. Паршиковым, актуальны. Научная новизна заключается в совершенствовании контактного метода сглаженных частиц.

В результате диссертационного исследования разработан новый вычислительный инструмент. Разработанный пакет программ имеет прикладное значение и может быть востребован в области теоретической и прикладной механики сплошной среды при решении практических задач в пространственно неоднородных средах при наличии больших деформаций. Это подтверждает приведенный пример расчета взрыва конденсированного взрывчатого вещества в оболочке из песка.

Замечания по тексту диссертации:

1. При выводе соотношений для корректировки градиента сглаживающего ядра и скорректированной системы уравнений (2.20) – (2.28) пропущены промежуточные выкладки, которые могли бы облегчить читателю понимание и воспроизведение полученных результатов.

2. Автор использует в трехмерном случае простейший алгоритм дробления частицы на 8 одинаковых частиц. Этот алгоритм не гарантирует увеличения точности расчета в общем случае. Известные более сложные методы дробления с выбором пространственного шаблона (pattern), зависящего от локальных особенностей течения, не обсуждаются..

3. Алгоритм слияния частиц позволяет избавиться от маленьких частиц (тем самым уменьшить общее число частиц) и увеличить шаг интегрирования по времени. Однако алгоритм слияния, описанный в разделе 3.4.3, в общем случае не позволяет избавиться от всех маленьких частиц за один шаг по времени. Если именно мелкие частицы определяют шаг интегрирования по времени, то увеличить шаг не удастся. При этом общее число частиц уменьшится, и расчет станет более эффективным только за счет уменьшения числа частиц. Возможность увеличения шага по времени в этом случае будет упущена.

4. В разделе 3.6.6 тестовая задача о распаде разрыва (blast wave) выполнена для случая, когда плотности на начальном разрыве одинаковы, а давления отличаются в 10 000 раз. Рассматривается совершенный газ с показателем политропы 1.4. Таким образом, справа от разрыва температура составляет около 300 К, а слева около 3 000 000 К. Какому практически реализуемому физическому процессу соответствует такая задача? Отметим, что далее автор решает задачу о взрыве заряда конденсированного взрывчатого вещества в воздухе. В этом случае плотности на начальном разрыве отличаются в ~ 3000 раз, а температуры ~ в 10 раз.. Представляется, что было бы полезнее привести решение

тестовой задачи о распаде разрыва для такого практически важного случая.

5. В разделе 4.3.1 приведен расчет течения, возникающего при взрыве в воздухе заряда конденсированного ВВ с оболочкой из песка. В диссертации не удалось найти информацию о начальном размере и количестве сглаженных частиц, используемых в расчете.

Приведенное распределение песка в различные моменты времени в деталях может качественно не соответствовать тому, которое наблюдается в эксперименте. Обычно сначала образуются не кольца, а саблевидные фрагменты оболочки. Саблевидные фрагменты в осесимметричном расчете получены быть не могут.

6. В диссертации сказано, что при моделировании взрыва заряда в воздухе использовались все предложенные улучшения контактного метода сглаженных частиц. Эффективность сделанных улучшений можно было бы оценить, если бы был выполнен анализ того, насколько и какие улучшения увеличивают точность расчета по сравнению с базовым контактным методом сглаженных частиц в этой прикладной задаче. Надеюсь, что работа будет продолжена и автор выполнит такое исследование в будущем.

7. Осесимметричный вариант метода сглаженных частиц включен в известные коммерческие коды. Автор не пишет о том, какие задачи не могут быть решены с помощью этих кодов, но могут быть решены с использованием разработанного пакета прикладных программ или насколько и для каких задач разработанный пакет превосходит эти коды в эффективности. Следует отметить, что контактный метод сглаженных частиц в коммерческих кодах не используется и такое сравнение позволило бы судить об эффективности такого подхода в целом.

Оппонент отмечает, что диссертационная работа Рублева Г.Д., несмотря на отдельные стилистические неточности, хорошо оформлена и иллюстрирована. Приведенные замечания не влияют на достоверность полученных в диссертации результатов и на общую положительную оценку работы.

*В отзыве официального оппонента к.ф.-м.н. Стояновской О.П.:*

По мнению оппонента, полученное соискателем первое дифференциальное приближение (ПДП) для CSPH-аппроксимации уравнений газовой динамики в декартовой и цилиндрической системе координат является новым научным результатом, имеющим прикладное значение. ПДП позволяет получать формулы для корректировки дискретного градиента в методе SPH. Эта корректировка в некоторых случаях уменьшает погрешность численного решения, причем в разработанном в диссертации осесимметричном случае практически без увеличения вычислительных затрат. Отмечена перспективность развития этого подхода за счет того, что процесс получения ПДП для SPH может быть

алгоритмизирован и затем автоматизирован, поскольку уже разработана библиотека, решающая аналогичную задачу для метода конечных разностей [M. Karam, J. C. Sutherland, and T. Saad, ‘PyModPDE: A python software for modified equation analysis,’ *SoftwareX* 12 (2020)].

Замечания по тексту диссертации:

1. В главе 1 приведено уравнение неразрывности, записанное в терминах объемных деформаций (уравнение 1.1). Однако далее по тексту отсутствует обсуждение преимуществ такого подхода по сравнению с традиционной записью уравнения в терминах плотности. Отмечу, что при решении уравнений газовой динамики запись уравнения неразрывности в терминах плотности позволяет использовать альтернативный подход к его решению. В этом подходе плотность рассчитывается как сумма масс соседних частиц с весом, определяемым функцией сглаживающего ядра. Опыт рецензента показывает, что в некоторых случаях схема, основанная на таком подходе, имеет существенно более широкую область устойчивости, чем схема, в которой плотность находится из решения уравнения в частных производных.

2. В главе 2 приводятся обоснования свойств метода CSPH средствами вычислительной математики. При этом отсутствуют ссылки на аналогичные работы других авторов, в связи с чем из текста диссертации невозможно понять следующие факты.

2.1. Какие выкладки сделаны автором впервые, а какие приведены для системности изложения материала. В частности, дисперсионное соотношение (2.7) приводится также в работе S.-H. Cha and A. P. Whitworth, ‘Implementations and tests of Godunov-type particle hydrodynamics,’ *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 340, 73–90 (2003) (смотри уравнение (46)), ссылка на которую отсутствует в диссертации.

2.2 Как соотносятся результаты анализа, сделанного автором, с известными ранее результатами. В частности, при анализе погрешности CSPH с использованием разложения функции нескольких переменных в ряд Тэйлора автором диссертации показано, что метод имеет первый порядок аппроксимации по  $h$  - радиусу сглаживания. При этом как в теории (используя дисперсионный анализ), так и на практике (при решении одномерных уравнений газовой динамики) методом SPH (без использования решения задачи Римана) можно получить второй порядок аппроксимации по  $h$  на гладких решениях при равномерной упаковке частиц. Представляется целесообразным пояснить, является ли данный вывод результатом систематического занижения порядка погрешности за счет использования ряда Тэйлора, предположения о неравномерности упаковки частиц или же

первый порядок приносится за счет использования решателей Римана для гладких решений.

3. В подразделе 2.1.2 для контактного метода CSPH строится приближенное дисперсионное соотношение (ПДС), а в подразделе 2.2.2 для него же строится первое дифференциальное приближение (ПДП). Представляется логичным сопоставить результаты, то есть выделить свойства, о которых дают информацию ПДС и ПДП, и свойства, которые проявляются только в одном из подходов.

4. В главе 3 приведено описание большого количества тестов по верификации разработанного метода, но опущены несколько моментов, позволяющих оценить значимость результатов.

4.1. Не приведено сведений о том, насколько использование интерпретатора Python влияет на время счета задач.

4.2. При описании кейсов часто опущены ключевые данные по счетным параметрам метода, например, непонятно сколько частиц приходится на расчетную область практически во всех тестах главы 3.

4.3. На стр. 64 приведено определение квазиравномерной упаковки частиц и утверждение, что если частицы расположены квазиравномерно, то «корректировка градиента ядра улучшает SPH-аппроксимацию», там же сказано, что в коде корректировка градиента выполняется только после того, как установлена квазиравномерность упаковки. При описании тестов на корректировку градиента в разделе 3.6 не указано, как часто частицы оказываются квазиупорядоченными и корректировка градиента действительно реализуется. Естественно предположить, что в тестах с разрывными решениями квазиравномерность расстановки частиц быстро утрачивается. Однако на практике погрешность расчетов разрывных решений также уменьшается. Предположения соискателя, разрешающие это противоречие, в диссертации отсутствуют.

5. В пункте 3.6.5 обсуждаются решения цилиндрической задачи Сода, полученные осесимметричным методом CSPH и осесимметричным методом с корректировкой градиента ТКС-CSPH. Показано, что ТКС-CSPH позволяет получать осесимметричные решения для таких счетных параметров, при которых в CSPH наблюдается нарушение симметрии.

Есть ли у соискателя предположения, объясняющие эту разницу.

6. Глава 4 содержит результаты валидации реализованных моделей на известных экспериментальных данных. При этом глава называется “Примеры применения разработанных численных алгоритмов”, что по мнению рецензента не отражает содержания. Для того, чтобы содержание главы соответствовало названию, целесообразно

либо дополнить содержание (конкретизировать, для каких предсказаний разработана модель и комплекс программ, а также указать текущие ограничения модели), либо поменять название на “Валидация модели”.

Оппонент отмечает, что, несмотря на высказанные замечания, диссертация Рублева Г.Д представляет собой законченную научную работу, результаты которой являются новыми и могут быть использованы в дальнейших исследованиях и инженерном проектировании. Диссертационное исследование содержит все этапы, включенные в название специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

*Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., члена-корреспондента РАН Иногамова Наиля Алимовича:*

В отзыве указано, что диссертационная работа «Численный метод CSPH с корректировкой градиента сглаживающего ядра и его применение в механике деформируемых сред» посвящена важнейшим проблемам вычислительной гидродинамики в применении к реальным острым проблемам. В работе разработаны схемы, во-первых, позволяющие контролировать довольно большую схемную вязкость популярного контактного метода CSPH – contact SPH – smoothed particle hydrodynamics. Во-вторых, соискателю удалось разработать и включить в программный пакет РурНИА блок учета поверхностного натяжения. Это достижение представляется автору отзыва весьма существенным, так как в его исследованиях часто приходится сталкиваться с капиллярными явлениями, и даже того, что сделано в диссертационной работе (ограничение, связанное с осесимметричной геометрией), достаточно, чтобы в будущем решить ряд существенных проблем.

В отзыве содержится следующее замечание по содержанию автореферата:

Автор диссертации рассмотрел важную задачу о прохождении ударной волны через жидкость со сферическим пузырем газа. Это трудная задача. Результат показан на рис. 3. К сожалению, данные представлены вкратце. Не указано начальное давление в воздушном пузыре (оно равно нулю?). Не указано какой момент времени выбран за начало отсчета времени.

В отзыве отмечается, что замечание не является принципиальным, относится к оформлению результатов и не влияет на общую положительную оценку работы. Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, содержащее существенные результаты в области развития численных методов механики сплошных сред. Работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

*Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., проф. Голуба Виктора Владимировича:*

В отзыве отмечается, что актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений, поскольку она посвящена развитию современных численных методов моделирования сложных процессов в механике сплошных сред.

По содержанию автореферата высказаны следующие замечания:

- в автореферате отсутствует информация о времени, затраченном на проведение численного моделирования;
- в автореферате не приведено достаточно подробного описания постановки представленных численных тестов.

При этом в отзыве указано, что замечания не являются принципиальными и не снижают общего положительного впечатления от работы.

**Выбор официальных оппонентов** и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и высоким уровнем компетентности по всем основным вопросам, рассмотренным в диссертации, включая численное моделирование течений сжимаемых сред при помощи метода сглаженных частиц, анализ SPH-схем, реализацию программных комплексов, что подтверждается списком публикаций официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

1) **Предложен** подход к введению физической вязкости и управлению схемной вязкостью для схемы контактного метода сглаженных частиц CSPH.

2) **Разработан** способ корректировки градиента сглаживающего ядра для контактного метода гидродинамики сглаженных частиц, которая расширяет известный подход к уточнению классических SPH-схем на семейство схем CSPH (включая методы с повышенным порядком реконструкции) и позволяет повысить точность моделирования.

3) **Разработано** семейство осесимметричных схем контактного метода CSPH, обеспечивающих сохранение полного импульса и полной энергии, для моделирования сжимаемых сред с высоким пространственным разрешением.

4) **Предложен** подход к учёту поверхностного натяжения в методе CSPH (без учёта эффектов смачивания) с помощью граничного условия на внешнее давление, реализованного с корректировкой веса фиктивных частиц.

5) **Созданы** новые модули для программного комплекса RuPHIA, реализующие разработанные соискателем численные методы и алгоритмы для моделирования вязких

течений, поверхностных явлений и упругопластических сред в условиях сильной деформации.

б) С использованием разработанных численных методов и алгоритмов **проведено** моделирование ослабления воздушных ударных волн с помощью разрушаемых песчаных преград и выполнено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что проведено теоретическое исследование свойств схемы контактного метода сглаженных частиц CSPH, разработана корректировка градиента сглаживающего ядра.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики.**

В рамках развития программного комплекса РуРНIA созданы и интегрированы новые численные схемы и алгоритмы. Тестирование подтвердило эффективность новых модулей для решения прикладных задач гидродинамики: моделирования ударных волн, вязких течений и капиллярных явлений. Практической значимостью также обладают результаты исследования источников ошибок аппроксимации в методе CSPH.

**Оценка достоверности результатов исследования** показала, что теоретическое обоснование работы построено на известных и проверяемых данных и фактах и полностью согласуется с опубликованными материалами по теме диссертации. В основе предложенной идеи лежит анализ свойств схемы CSPH с помощью формулы Тейлора и дисперсионного анализа, дополненный обобщением опыта других исследователей по повышению точности моделирования методом сглаженных частиц. Для валидации и верификации разработанных численных методов и алгоритмов, а также реализованных программных решений, были привлечены: экспериментальные данные, известные точные аналитические решения, результаты моделирования, полученные другими авторами. В ходе проверки установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с данными, представленными в независимых источниках по исследуемой тематике — в тех случаях, когда подобное сопоставление является обоснованным.

**Личный вклад соискателя** состоит в проведении численного моделирования всех представленных в диссертации задач, анализе полученных численных результатов, проведении анализа свойств схемы CSPH и разработке корректировки градиента сглаживающего ядра для этой схемы. Соискателем лично получено новое семейство осесимметричных схем контактного метода CSPH, обеспечивающих сохранение полного импульса и полной энергии. Лично соискателем предложен, реализован и протестирован

алгоритм учёта внешнего давления и поверхностного натяжения. Подготовка основных публикаций по теме диссертации выполнена соискателем.

Численная реализация в рамках программного комплекса РурНИА проводилась соискателем под руководством научного руководителя. Статья по вязкости в методе CSPH написана в соавторстве с А.Н. Паршиковым и является продолжением его работ.

В ходе защиты диссертации вопросы соискателю задали члены диссертационного совета: д.ф.-м.н. Головизнин В.М., д.ф.-м.н. Меньшов И.С., д.ф.-м.н. Змитренко Н.В., д.ф.-м.н., Орлов Ю.Н., д.ф.-м.н., Гаранжа В.А.

Головизнин В.М. спросил, является ли блок построения списка соседей стандартным или там тоже есть какие-то изменения автора. Соискатель ответил, что эта часть кода является стандартной. Меньшов И. С. спросил, можно ли применять корректировку вязкости в методе SPH для улучшения точности решения без учёта физической вязкости. Соискатель ответил, что применение корректировки вязкости возможно без ведения физической вязкости, но тестов с целью повысить точность метода в общем случае (не только при моделировании вязких течений) с помощью такой корректировки не проводилось. Затем Меньшов И. С. поинтересовался, работает ли установка условия на жёсткую стенку на оси симметрии. Соискатель пояснил, что для моделирования жёсткой стенки используются зеркально отражённые частицы, но для этого локально приходится переходить на другую схему. Змитренко Н.В. поинтересовался, какие проводились расчёты, где важна не схемная вязкость, а именно физическая и какое при этом использовалось уравнение состояния. Соискатель ответил, что примером такого расчёта является опускание шарика в вязкой жидкости и результаты этого расчёта согласуются с формулой Стокса, а в качестве уравнения состояния использовалось линейное уравнение состояния. Затем Змитренко Н.В. спросил, зачем было проведено моделирование взрыва в атмосфере и нельзя ли было это сделать с помощью других подходов. Соискатель ответил, что моделирование задачи Седова проводилось с целью тестирования. Орлов Ю.Н. задал вопрос, откуда были взяты константы для кинетики детонации и уравнения состояния продуктов детонации при моделировании взрыва внутри песчаных цилиндров. Соискатель ответил, что константы были взяты из литературы. Затем Орлов Ю.Н. спросил, действительно ли при моделировании вязких течений используется тензор вязких напряжений или это просто «фигура речи». Соискатель ответил, что при моделировании вязкости тензор вязких напряжений в коде напрямую не фигурирует, а вместо этого используется вектор вязких напряжений на плоскости контакта SPH-частиц. Гаранжа В.А. поинтересовался, используется ли разбиение на ячейки Вороного при поиске ближайших

частиц и перестраиваются ли ячейки Вороного на каждом шаге. Соискатель ответил, что для построения списка соседних частиц используется не разбиение на ячейки Вороного, а алгоритм построения списка Верле. Соискатель также уточнил, что разбиение на ячейки Вороного используется только при распределённом расчёте для распределения частиц по вычислительным узлом. Затем Гаранжа В.А. спросил, через какие плоскости считаются потоки в схеме. Соискатель ответил, что потоки рассчитываются на плоскостях контакта частиц, которые перпендикулярны линии, соединяющей центры частиц. Головизнин В.М. задал уточняющий вопрос, подразумевается ли трёхмерная область под словом «декартова» или это двухмерная область. Соискатель ответил, что под моделированием в декартовых координатах может подразумеваться одномерная, двухмерная или трёхмерная геометрия, примеры расчётов во всех трёх случаях представлены в диссертации.

На заседании 29 января 2026 года диссертационный совет принял решение за разработку модификаций контактного метода гидродинамики сглаженных частиц, вносящих существенный вклад в развитие методов математического моделирования присудить Рублеву Георгию Дмитриевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» - 18, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Зам. председателя

диссертационного совета

Тишкин Владимир Федорович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Корнилина Марина Андреевна

29.01.2026

