

УТВЕРЖДАЮ



Директор ФГУП «ВНИИА»

Доктор экономических наук

Допарев С.Ю.

09 2025 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного унитарного предприятия  
«Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»  
(ФГУП «ВНИИА»)  
по диссертационной работе Рублева Георгия Дмитриевича  
«Численный метод CSPH с корректировкой градиента сглаживающего ядра и его  
применение в механике деформируемых сред»,  
представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы  
программ»

Диссертационная работа на тему «Численный метод CSPH с корректировкой градиента сглаживающего ядра и его применение в механике деформируемых сред» выполнена Рублевым Г.Д. в отделении 31 федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»). В период подготовки диссертации соискатель обучался в очной аспирантуре ФГУП «ВНИИА» и работал в должности младшего научного сотрудника, с 1 августа 2024 года – научного сотрудника (по настоящее время) подразделения математического моделирования отделения 31 ФГУП «ВНИИА».

В 2021 году Рублев Г.Д. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» по специальности «Физика». С 2021 г. по 2025 г. проходил обучение в очной аспирантуре ФГУП «ВНИИА» по направлению подготовки 03.06.01 «Теоретическая физика». Справки о сдаче кандидатских экзаменов по иностранному языку и истории и философии науки выданы в 2025 году федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова». Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности выдана федеральным государственным учреждением «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в 2025 году.

По результатам обсуждения диссертации «Численный метод CSPH с корректировкой градиента сглаживающего ядра и его применение в механике деформируемых сред» научно-

техническим советом отделения 31 ФГУП «ВНИИА» принято следующее заключение.

Диссертация Рублева Г.Д. посвящена методам снижения ошибок аппроксимации контактного метода гидродинамики сглаженных частиц CSPH, а также развитию метода CSPH для моделирования вязких течений, поверхностных явлений, более точного моделирования механики упругих и упругопластических сред. Рублев Г.Д. модифицировал контактный метод гидродинамики сглаженных частиц CSPH, автором которого является д.ф.-м.н. Паршиков Анатолий Николаевич, который работает в подразделении 31 ФГУП «ВНИИА» и принимал участие в обсуждении результатов диссертации.

В диссертации на защиту выносятся следующие **положения**:

1. Способ моделирования вязкой сжимаемой среды с использованием корректирующего тензора вязких напряжений в рамках метода CSPH.

2. Методика повышения точности аппроксимации пространственных производных путем корректировки градиента сглаживающего ядра ТКС для семейства контактных методов CSPH.

3. Осесимметричная численная схема CSPH, обеспечивающая сохранение полного импульса и полной энергии, для моделирования сжимаемых сред с высоким пространственным разрешением.

4. Алгоритм учета внешнего давления с корректировкой веса фиктивных частиц для моделирования поверхностного натяжения, в том числе в осесимметричной постановке.

5. Модули программного комплекса РуРНИА для математического моделирования вязких течений, поверхностных явлений, а также задач механики упругопластических сред в условиях сильной деформации как в декартовой, так и в осесимметричной геометрии.

**Целью** диссертационной работы является развитие семейства контактных методов гидродинамики сглаженных частиц CSPH с компенсацией ошибок аппроксимации и создание соответствующих модулей в рамках программного комплекса РуРНИА, разработанного при участии автора диссертации, для достоверного моделирования вязких течений, поверхностных явлений, а также задач механики упругопластических сред в условиях больших деформаций.

**Актуальность.** При моделировании задач механики сплошных многокомпонентных сред с большими относительными скоростями деформации использование сеточных численных методов затруднено ввиду быстрого изменения формы свободных границ и границ раздела материалов, возможного наличия таких явлений как откол и кавитация. К таким задачам относятся, например, пробитие преград, кумуляция, разрушение преград взрывом. При решении таких задач в рамках сеточного эйлера подхода возникает необходимость расчёта смешанных ячеек, а лагранжев формализм невозможен без перестроения сетки. Оба метода требуют применения специальных методик.

В качестве возможной альтернативы рассматривается переход к бессеточным лагранжевым методам частиц, таким, как метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH). В методе SPH среда представляется произвольным набором точек, каждая из которых связана со своим малым объёмом фиксированной массы (так называемые «сглаженные» частицы). Такие частицы не имеют постоянных связей, а отслеживание контактных и свободных границ происходит при расчёте автоматически.

Метод CSPH обладает высокой схемной вязкостью и сравнительно низкой точностью аппроксимации пространственных производных, что препятствует его широкому распространению. Для реалистичного моделирования течений вязкой жидкости необходимы способы введения физической вязкости и компенсации схемной вязкости. Для моделирования поверхностных явлений требуются особые граничные условия. Некоторые задачи допускают переход к осесимметричному моделированию, что позволяет значительно снизить требования к вычислительным ресурсам (уменьшить объём используемой памяти и количество используемых вычислительных узлов) при сохранении высокой точности пространственной дискретизации расчётной области.

Все результаты, полученные в диссертации, являются новыми. В работах, сделанных в соавторстве, вклад автора является существенным или определяющим. Автор диссертации Рублев Г.Д. разработал новые численные алгоритмы, а именно, корректировку градиента сглаживающего ядра для семейства методов CSPH (ТКС), метод определения веса фиктивных частиц для задания граничного условия внешнего давления, семейство осесимметричных схем CSPH, которые обеспечивают сохранение полного импульса и полной энергии в замкнутых системах. Автор принимал непосредственное участие в разработке и верификации метода управления схемной вязкостью под руководством научного консультанта А.Н. Паршикова. Программная реализация численных алгоритмов выполнена автором под руководством научного руководителя Дьячкова С.А. Все результаты численного моделирования представленных в диссертационной работе задач получены автором самостоятельно под руководством научного руководителя Дьячкова С.А. Анализ результатов численного моделирования взрыва внутри разрушаемых песчаных цилиндров выполнен под руководством научного консультанта А.Н. Паршикова.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что полученные результаты расширяют область применимости контактного метода гидродинамики сглаженных частиц. Разработанный метод управления вязкостью позволяет моделировать вязкие течения и потенциально может быть использован при моделировании вязкоупругих и вязких упругопластических сред. Разработанная корректировка градиента сглаживающего ядра ТКС позволяет снизить погрешность моделирования. Разработанный осесимметричный контактный метод SPH позволяет проводить моделирование задач (допускающих переход к осесимметричной постановке) с высокой точностью пространственной дискретизации расчётной области.

### **Публикации.**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных журналах:

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*. 36(1), 2024. (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*. 2024. V. 488. (Scopus, Web of Science)

3. Г. Д. Рублев, С. А. Мурзов. Моделирование прохождения ударной волны через пористую медь с помощью метода подвижного окна для сглаженных частиц с корректировкой градиента сглаживающего ядра. ВАНТ, Серия: математическое моделирование физических процессов. 2025. № 1, С. 39-50. (Список ВАК)

4. G. D. Rublev. Surface tension modeling using the axisymmetric contact smoothed particle hydrodynamics method. Journal of Applied and Computational Mechanics. 2025. (Scopus, Web of Science)

Опубликованные работы соответствуют теме диссертационной работы и отражают ее содержание.

Диссертация «Численный метод CSPH с корректировкой градиента сглаживающего ядра и его применение в механике деформируемых сред» Рублева Георгия Дмитриевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании научно-технического совета отделения 31 ФГУП «ВНИИА» (протокол от 16 июня 2025 года № 30). Присутствовали 13 человек. Результаты голосования: «за» - 13 чел., «против» - 0 чел., воздержались - 0 чел.

Научный руководитель ФГУП «ВНИИА», доктор  
физико-математических наук

 А.В. Андрияш

Начальник научно-теоретического отделения,  
доктор физико-математических наук

 С.Е. Куратов