



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ

**Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е.И. Забабахина»
(ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»)**

УТВЕРЖДАЮ:



Директор РФЯЦ-ВНИИТФ
кандидат экономических наук

М.Е. Железнов

19 января 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Диссертация Рублева Георгия Дмитриевича 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.

Актуальность темы

Благодаря отсутствию сетки, метод CSPH позволяет избежать проблем с её искажением, которые характерны для сеточных лагранжевых методов при моделировании процессов с большими деформациями. В методе CSPH при расчёте взаимодействия между частицами используется решение задачи о распаде разрыва (задача Римана). Этот метод хорошо себя зарекомендовал при моделировании ударно-волновых процессов, формирования кумулятивных струй, задач пробития преград, задач с разрушением материалов.

Тем не менее, из-за высокой схемной вязкости и сравнительно низкой точности аппроксимации пространственных производных некоторые классы задач, где CSPH мог бы оказаться полезным инструментом, были либо недоступны для этого метода, либо требовали большей точности, чем стандартный метод CSPH мог обеспечить. К таким задачам относятся, например, моделирование поверхностных явлений, моделирование вязких течений, моделирование взрывов в атмосфере и

взаимодействия ударных волн с различными препятствиями. Для решения этих проблем в диссертационной работе предложены:

- формула для оценки схемной вязкости;
- метод компенсации схемной вязкости;
- корректировка градиента сглаживающего ядра для семейства контактных методов гидродинамики сглаженных частиц.

Математическое моделирование задач в трёхмерной постановке с большим количеством SPH-частиц требует использования большого количества вычислительных узлов, что приводит к большим затратам электроэнергии и времени. Ввиду того, что некоторые задачи допускают переход к моделированию в осесимметричной постановке, где высокую точность пространственной дискретизации можно обеспечить за счёт небольшого (по сравнению с трёхмерной постановкой) числа частиц, разработка осесимметричного метода CSPH также является актуальной задачей. В диссертационной работе предложено семейство осесимметричных CSPH-схем, которые обеспечивают сохранение полного импульса и полной энергии в замкнутых системах.

Соответствие паспорту специальности ВАК

Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности ВАК 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Апробация

Материалы диссертации докладывались на одиннадцати международных и российских конференциях. По теме диссертации опубликовано четыре работы. Три из них опубликованы в иностранных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus. Одна работа опубликована в журнале из перечня ВАК.

Личный вклад автора

Одна из опубликованных работ, где представлены основные результаты диссертации, написана в соавторстве с А.Н. Паршиковым и является продолжением его работ. Представленные в этой публикации результаты были получены при непосредственном участии соискателя. В остальных опубликованных работах вклад соискателя является определяющим.

Научная новизна

В диссертации представлены значительные научные достижения, которые вносят важный вклад в развитие контактных методов SPH. В частности, впервые проведён теоретический анализ свойств схемы CSPH, который позволил установить, что схемная вязкость при моделировании сдвигового течения аналогична физической, а также была получена формула для оценки коэффициента схемной динамической сдвиговой вязкости. Более того, в рамках исследования предложена процедура корректировки градиента сглаживающего ядра для семейства методов CSPH, что улучшает аппроксимацию пространственных производных. Важным шагом является также разработка семейства осесимметричных схем CSPH, которые удовлетворяют законам сохранения импульса и энергии. Дополнительный вклад включает создание алгоритма учета

внешнего давления и поверхностного натяжения с корректировкой веса фиктивных частиц, который был адаптирован для осесимметричной постановки задач. Разработанные программные модули в рамках комплекса РуРНИА позволяют проводить моделирование вязких течений, поверхностных явлений и задач механики упругопластических сред как в декартовой, так и в осесимметричной геометрии.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сравнением результатов с известными аналитическими решениями и экспериментальными данными, а также результатами, полученными ранее другими авторами.

Практическая значимость.

Расширена область применимости контактного метода CSPH на вязкие сжимаемые среды и на задачи с поверхностным натяжением. Рассмотренный механизм корректировки схемной вязкости позволяет снижать её до незначительного, относительно физической вязкости, уровня. Предложенная корректировка градиента сглаживающего ядра позволяет повысить аппроксимацию пространственных производных.

Предложенные доработки осесимметричного контактного метода CSPH позволили расширить его применимость на широкий класс задач, представляющих практический интерес.

Предложенные методы и алгоритмы уже реализованы в программном комплексе РуРНИА и используются для проведения расчётов на современных высокопроизводительных вычислительных системах.

Подробное описание предложенных методов и алгоритмов позволяет внедрить их в другие программные комплексы, расширив их функциональность и отказоустойчивость.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе приводится описание основных математических моделей и численных методов, используемых в работе для описания сплошных сред, а также граничного условия для моделирования поверхностного натяжения.

В третьей части первой главы приводится подробный вывод уравнений семейства схем осесимметричного метода CSPH, обеспечивающих сохранение полного импульса и полной энергии в замкнутых системах. Обсуждается граничное условие для частиц, находящихся вблизи оси симметрии.

В четвёртой части данной главы приводится описание граничного условия внешнего давления, с помощью которого моделируется поверхностное натяжение.

Вторая глава посвящена методам повышения точности контактного метода SPH. В диссертационной работе приводится подробный анализ уравнений метода CSPH. В разделе 2.2.4 получена формула для оценки схемной вязкости метода CSPH. В разделах 2.3, 2.4 и 2.5 вводится корректировка градиента сглаживающего ядра в уравнения контактного метода SPH. В разделе 2.6 вводится метод

управления схемной вязкостью, позволяющий избавиться от избыточной схемной вязкости метода CSPH.

В третьей главе приводится описание реализации разработанных алгоритмов в рамках программного комплекса РупНІА. В разделе 3.4 приведены алгоритмы дробления и слияния SPH-частиц. На ряде тестовых задач показано, что разработанные алгоритмы позволяют достигать высокой точности результатов моделирования, значительно лучших, чем при использовании стандартного метода

В четвертой главе приведены результаты моделирования некоторых практических задач с помощью разработанных численных методов.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Автореферат соответствует установленным требованиям и полностью отражает основное содержание работы.

По диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. В тексте работы присутствуют орфографические и пунктуационные ошибки, автор часто путает курсивное и прямое начертания в математических обозначениях.
2. Присутствует невнимательная запись некоторых формул: пропущенные или лишние знаки минуса (формулы: 1.7, 1.30-1.31 и др.), лишние или потерянные множители (стр. 51 условие 1, формула 2.41, нижняя формула на стр. 68 и др.) и прочие.
3. Предложенный в разделе 2.3 «Корректировка градиента сглаживающего ядра в методе CSPH» подход является не до конца исследованным. Это выражается в том, что для удобства применения корректировки в рамках контактной модели, корректирующие члены отнесены к контактными величинам (величинам «со звёздочкой»). И если в уравнениях неразрывности и движения (включающих или U^{*R} , или P^* поодиночке) это согласуется с общеупотребимыми подходами корректировки градиентов в методах SPH, то для уравнения энергии, содержащего произведение P^*U^{*R} , предлагаемый подход отличается от общепринятого, так как, по сути, корректировка применяется дважды — и для P^* , и для U^{*R} отдельно. В то время как стандартной является *однократная* корректировка, так как это именно корректировка *градиента сглаживающего ядра*, а указанный градиент ядра присутствует в SPH-сумме в единственном экземпляре.
4. Постановки тестовых расчётов описаны неполно, что не даёт возможности их повторить по другим программам.
5. Исторически принятое А.Н. Паршиковым и его коллегами сокращение CSPH, от слова Contact, совпадает с другим широко используемым сокращением — Corrected SPH. В то же время, для принятого некоторыми другими учёными обозначения «контактного» подхода А.Н. Паршикова в виде GSPH (от имени Godunov), совпадения сокращения с посторонними (например Generalized SPH) встречаются реже.

Приведённые замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Диссертационная работа Рублева Георгия Дмитриевича полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённых постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

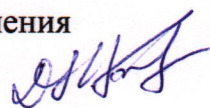
Отзыв ведущей организации на диссертационную работу Рублёва Г.Д. дан по результатам обсуждения работы на заседании НТС научно-теоретического отделения РФЯЦ-ВНИИТФ (протокол № 320 от 13.01.2026 г.).

Председатель НТС научно-теоретического отделения
РФЯЦ-ВНИИТФ, д.ф.-м.н.



А.А. Брагин

Ученый секретарь НТС научно-теоретического отделения
РФЯЦ-ВНИИТФ, к.ф.-м.н.



Д.Н. Боков