

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, доцента, заведующего кафедрой суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов института лазерных и плазменных технологий Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» Шаргатова Владимира Анатольевича на диссертационную работу Рублева Георгия Дмитриевича «Численный метод CSPH с корректировкой градиента сглаживающего ядра и его применение в механике деформируемых сред», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность работы. Метод сглаженных частиц является полезным инструментом математического моделирования. Это бессеточный метод. Как правило, он используется в случаях, когда применение других методов затруднено или невозможно, например, для моделирования течений сплошных сред с большими деформациями, пробивания ударником металлических преград, ударных взаимодействий, приводящих, к фрагментации оболочек, взаимодействий волн на воде с дамбой и т.д. Для тех задач механики сплошной среды, которые могут быть решены с помощью структурированных сеток в переменных Эйлера, метод сглаженных частиц демонстрирует значительно более низкую точность. Это связано с тем, что каждая частица обменивается импульсом и энергией с другими частицами, число которых обычно варьируется от 50 до 500 и более для задач в трехмерной постановке. На регулярной сетке в декартовых координатах каждая ячейка получает массу, импульс и энергию только через 6 границ. При сопоставимом времени расчета на высокопроизводительной вычислительной системе в методе сглаженных частиц приходится использовать примерно в 10 раз меньше частиц, чем ячеек на регулярной сетке. Таким образом, любое повышение точности метода без увеличения числа частиц является крайне желательным, и такие попытки улучшения предпринимаются до настоящего времени. Обычно авторам удается получить более точный результат для некоторого узкого круга задач, чем и обусловлено большое количество работ, не приводящих к значительному улучшению метода в общем случае. Один из вариантов метода сглаженных частиц, получивший признание научного сообщества, был разработан А.Н. Паршиковым. Улучшения этого метода, предложенные соискателем, актуальны.

Научная новизна исследования заключается в совершенствовании контактного метода сглаженных частиц. Насколько известно автору отзыва, предложенные варианты улучшения контактного метода сглаженных частиц с помощью кусочно-линейной реконструкции, корректировки градиента ядра в уравнениях для импульса и энергии, слияния и дробления частиц, уменьшения диссипации и сдвига частиц ранее описаны не были. Новым применительно к методу сглаженных частиц является численный метод для осесимметричного течения, позволяющий сохранить импульс и полную энергию. Результатом диссертации

является оригинальный программный комплекс для проведения двумерного моделирования сложных течений в пространственно-неоднородных средах. Подтверждением новизны является то, что основные результаты работы опубликованы в пользующихся доверием научного сообщества журналах (в том числе в журналах первого квартиля), для которых новизна, актуальность, достоверность, обоснованность и теоретическая или практическая значимость являются необходимыми условиями опубликования.

Практическая значимость исследования. 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. Кроме того, предложенные варианты повышения точности расчета методом сглаженных частиц могут использоваться авторами других пакетов прикладных программ. Пакет прикладных программ и результаты работы будут полезны для оценки последствий разрушительных взрывов и выявления закономерностей газодинамических процессов, сопровождающихся ударными волнами и протекающими в пространственно-неоднородных средах.

Апробация. Материалы диссертации докладывались на 5 российских и 5 международных конференциях, начиная с 2022 года. Список публикаций Рублева Г.Д. по теме диссертации содержит 4 работы в рецензируемых научных журналах, три из которых опубликованы в иностранных журналах, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science. Ещё одна работа была опубликована в журнале, входящем в перечень научных журналов из списка ВАК. Результаты работы полноценно представлены в публикациях соискателя.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов подтверждается верификацией использованных вычислительных алгоритмов и подробным анализом результатов расчетов. Модели и методы решения основаны на фундаментальных законах и разработаны в рамках общепринятых в научной среде современных подходов. Достоинством работы является валидация численного моделирования путем сравнения с высокоточными решениями большого количества типичных тестовых задач и экспериментальными данными.

Личный вклад автора диссертации. Все ключевые результаты были опубликованы в статьях, в которых Рублев Г.Д. является соавтором. Выступление Рублева Г.Д. на семинаре в НИЯУ МИФИ позволяет сделать вывод, что основные результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Содержание и результаты работы полностью соответствуют паспорту специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 167 страниц, включая 60 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 108 наименований.

Во *введении* обоснована актуальность диссертационного исследования, показана степень разработанности по теме исследования, сформулированы цели и задачи работы, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснована достоверность и приведена информация об апробации результатов.

В *первой главе* для вязких и упругопластических сжимаемых сред представлены математические модели, уравнения которых предлагается численно решать с помощью контактного метода сглаженных частиц. Предусмотрена возможность учитывать поверхностное натяжение на границе двух невязких жидкостей. Рассматривается осесимметричная постановка задачи. В этом случае сглаженные частицы не имеют условной сферической формы, что требует дополнительных усилий для формулировки уравнений метода сглаженных частиц, в том числе и в окрестности оси симметрии. Предложено улучшение контактного метода сглаженных частиц с помощью традиционной для методов конечного объема кусочно-линейной экстраполяции параметров среды на условную точку контакта между частицами. При этом используется ограничитель «minmod». Представлено семейство консервативных по импульсу и энергии схем для контактного метода сглаженных частиц. Описана аппроксимация граничных условий с помощью фиктивных частиц, которые вводятся для каждой частицы, находящейся вблизи границы. Показано, что предлагаемые улучшения позволяют увеличить точность расчета по сравнению с базовым методом при решении задачи о соударении двух капель жидкого олова.

Во *второй главе* выполнен дисперсионный анализ базового метода и проанализированы ошибки аппроксимации. Получена аналитическая приближенная оценка схемной вязкости контактного метода сглаженных частиц. Предложено уменьшить вклад схемной вязкости за счет введения дополнительного тензора вязких напряжений с отрицательным коэффициентом, который определяется разностной схемой. Для уменьшения неустранимых ошибок аппроксимации, которые возникают при нерегулярном распределении частиц, предложена скорректированная система уравнений численного метода. Предлагается вместо градиента сглаживающего ядра использовать значение, полученное с учетом дополнительных условий на согласованность. Использование корректировки требует получения некоторой обратной матрицы, которая в трехмерном случае имеет размерность 3×3 .

В *третьей главе* приводится описание алгоритма расчета с учетом предложенных

улучшений. Приведены фрагменты текстов программного кода. Представлено описание алгоритмов дробления и слияния частиц, которые оказываются слишком большими или слишком маленькими. Объединение происходит по две частицы, а дробление на 8 одинаковых частиц – в трехмерном случае. Это наиболее простой из известных вариантов дробления. Приведены результаты верификации разработанной улучшенной версии контактного метода сглаженных частиц. Выполнено более 15 расчетов тестовых задач. Показано, что разработанные алгоритмы позволяют достигнуть более точных результатов моделирования, чем при использовании базового контактного метода сглаженных частиц.

В четвертой главе приведены результаты решения нескольких задач. Эти результаты свидетельствуют об успешной валидации разработанного программного кода. При решении первой задачи выполнено моделирование обтекания вязкой жидкостью цилиндра с периодическими граничными условиями поперек потока. Вторая задача состоит в моделировании развития неустойчивости Рэлея-Плато для цилиндрической струи воды. В третьей задаче рассчитан процесс образования и распространения ударной волны в воздухе при взрыве заряда конденсированного взрывчатого вещества. Рассматривается взрыв заряда без оболочки и с оболочкой, состоящей из песка. Решение такой задачи имеет практическое значение.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, которые соответствуют заявленным целям работы.

В целом диссертация написана ясным научным языком, хорошо структурирована и оформлена. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, составлен с соблюдением установленных требований и дает полное и правильное представление о работе.

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 \sim 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.

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.

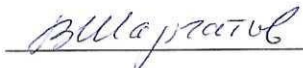
Заключение.

Диссертационная работа Рублева Георгия Дмитриевича соответствует требованиям «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».

Я, Шаргатов Владимир Анатольевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с деятельностью диссертационного совета, и на их последующую обработку.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических
процессов института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ

 В. А. Шаргатов

Подпись заведующего кафедрой суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических Шаргатова Владимира Анатольевича заверяю

ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ДИРЕКТОРА ДКПСР
НОСОВА О.В.



Дата «16» 01 2026 г