

## ПРОТОКОЛ № 6

Заседания диссертационного совета 24.2.327.08 от 15 декабря 2022 г.

**председатель диссертационного совета – д.ф.-м.н. Красильников П.С., ученый секретарь совета – д.ф.-м.н. Гидаспов В.Ю.,**

члены совета: д.ф.-м.н. Холостова О.В., д.ф.-м.н. Бардин Б.С., д.ф.-м.н. Бишаев А.М., д.ф.-м.н. Колесник С.А., д.ф.-м.н. Косенко И.И., д.т.н. Котельников В.А., д.ф.-м.н. Никитченко Ю.А., д.ф.-м.н. Ревизников Д.Л., д.ф.-м.н. Формалев В.Ф., д.т.н. Черепанов В.В.

**Всего присутствовало 12 чел.**

**Состав диссертационного совета утвержден в количестве 18 человек.**

**Повестка дня:** о приеме к защите диссертационной работы Способина Андрея Витальевича на тему «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твёрдыми частицами», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы» (физико-математические науки).

**Слушали:** профессора Формалева В.Ф. по диссертационной работе Способина Андрея Витальевича на тему «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твёрдыми частицами», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы» (физико-математические науки).

Экспертная комиссия полагает:

Диссертационная работа Способина Андрея Витальевича на тему «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твёрдыми частицами» является законченной научной работой, посвященной разработке и реализации вычислительных моделей двухфазного ударного слоя у поверхности обтекаемого сверхзвуковым потоком тела, а также эволюции ударного слоя под

воздействием высокоинерционных частиц.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ.

Материалы диссертации полностью изложены и опубликованы в 72 работах, в том числе в 25 статьях в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации либо включённых в международные реферативные базы данных.

Содержание автореферата полностью соответствует диссертации.

Автором диссертационной работы методами численного моделирования решён ряд задач механики запылённых потоков и получены следующие результаты:

1. Разработаны алгоритмы прямого численного моделирования динамики дисперсной фазы в сверхзвуковом запылённом потоке, позволяющие учесть столкновения частиц друг с другом, их вращение, отражения от обтекаемых потоком газа тел, а также обратное влияние примеси на течение несущего газа. Алгоритмы позволяют моделировать движение моно- и полидисперсной примеси частиц. Разработан метод частиц-представителей, позволяющий проводить прямое моделирование столкновительной примеси в трёхмерной при существенном сокращении вычислительных затрат.
2. Построена комплексная вычислительная модель многофакторного воздействия сверхзвукового запылённого потока на обтекаемую преграду, включающая модели двухфазного ударного слоя, теплопереноса и эрозионного разрушения преграды, а также радиационного теплообмена между дисперсной фазой и обтекаемой поверхностью. Модель позволяет в подробностях проследить картину движения, теплообмена и столкновительного взаимодействия полного ансамбля частиц в пылевом облаке, а также получить параметры динамического и энергетического взаимодействия

двухфазного ударного слоя с обтекаемой поверхностью.

3. С использованием разработанных методов и средств моделирования исследована роль столкновений между частицами, их вращения, а также обратного влияния дисперсной фазы на течение несущего газа с точки зрения динамического и теплового воздействия примеси на поверхность обтекаемой потоком преграды. Проведено разделение общего энергетического воздействия примеси на ударную, связанную с непосредственным взаимодействием частиц с поверхностью, конвективную, обусловленную диссипацией кинетической энергии набегающих частиц при торможении в ударном слое, и радиационную составляющие. Исследована роль составляющих при различных параметрах течения. Выполнен анализ влияния столкновений между частицами, обратного влияния примеси на течение газа, а также изменения формы преграды на интенсивность уноса массы и картину разрушения обтекаемого тела.
4. Исследовано обтекание тел полидисперсными запыленными потоками. Для бидисперсной примеси отмечено перераспределение энергетического и динамического воздействия на преграду между фракциями частиц различных размеров.
5. Разработана вычислительная модель и программное обеспечение для расчёта методом конечных объемов на адаптивных декартовых сетках в осесимметричной постановке обтекания газом высокоинерционной частицы, движущейся в сверхзвуковом ударном слое. Проведена серия расчётов, направленных на выявление характерных ударно-волновых и вихревых структур, образующихся при прохождении отраженной от поверхности частицы через головную ударную волну. Исследованы варианты продольного обтекания кругового цилиндра со сферическим затуплением и плоским торцом. Получены детальные пространственно-временные картины газодинамического взаимодействия возмущенной

области в окрестности частицы с макроскопическим течением в ударном слое и головной ударной волной. Вычислительные эксперименты показали, что важнейшую роль в формировании течения играет взаимодействие набегающего сверхзвукового потока с тороидальным вихрем, который образуется в сжатом слое вблизи оси симметрии и вызывает «невязкий» отрыв потока. Возникающая при этом кольцевая импактная струя обуславливает локальное повышение давления и теплового потока к обтекаемой поверхности.

6. В случае обтекания цилиндра с плоским торцом в вычислительных экспериментах зафиксированы колебательные режимы течения, обусловленные чередованием стадий роста и распада тороидального вихря. Проведено численное исследование колебательных режимов течения и теплообмена. Полученные путём математического моделирования ударно-волновые структуры, а также частоты и амплитуды колебаний хорошо согласуются с экспериментальными данными. Показано, что локальные величины давления и теплового потока в ходе колебательного процесса могут в несколько раз превышать значения для стационарного «невозмущенного» течения.
7. Исследовано воздействие ансамбля высокоинерционных частиц на ударный слой и интенсивность конвективного теплообмена. Вычислительные эксперименты показали, что газодинамическое взаимодействие последовательности частиц с ударным слоем обеспечивает поддержание повышенного уровня тепловых потоков в течение всего временного цикла и способствует общей интенсификации конвективного теплообмена.
8. Разработаны алгоритмы моделирования движения крупных частиц в ударном слое в трёхмерной постановке, в основе вычислительной модели лежит бессеточный метод решения системы уравнений газовой динамики. Выполнена программная реализация алгоритмов, позволяющая

использовать графические процессоры для ускорения расчётов. Поведено исследование газодинамического взаимодействия ансамбля частиц при движении в ударном слое. Отмечено кратное усиление теплового потока вблизи критической точки при движении частицы в ударном слое у поверхности сферы, которое согласуется с данными стендовых испытаний.

Перечисленные результаты являются новыми, оригинальными и научно обоснованными.

Диссертация соответствует профилю специальности 1.1.9. – «Механика жидкости газа и плазмы» и может быть принята к защите на заседании диссертационного совета 24.2.327.08.

**Выступили:** д.ф.-м.н. Колесник С.А., д.ф.-м.н. Никитченко Ю.А.

- Постановили:**
1. Утвердить в качестве официальных оппонентов по докторской диссертации Способина Андрея Витальевича следующих специалистов:
    - Циркунова Юрия Михайловича, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры Плазмогазодинамики и теплотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.
    - Пахомова Максима Александровича, доктора физико-математических наук, профессора РАН, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск.
    - Новикова Андрея Валерьевича, доктора физико-математических наук, начальника отдела федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Московская

область.

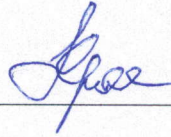
2. Утвердить в качестве ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.
3. Назначить дату защиты 17 марта 2023 г.
4. Разрешить печать автореферата диссертации на правах рукописи.
5. Утвердить список адресов рассылки автореферата диссертации.

**Результаты** За: 12,  
**голосования:** Против: нет,  
Воздержались: нет.

Председатель

Диссертационного совета

24.2.327.08, д.ф.-м.н., проф.

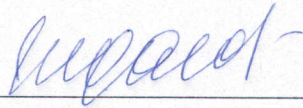


П.С. Красильников

Ученый секретарь

Диссертационного совета

24.2.327.08, д.ф.-м.н., с.н.с.



В.Ю. Гидаспов

Начальник отдела УДС МАИ

Т.А.

