

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



Буляккулов Марсель Маратович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО  
ПОТОКА С ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ ЛА**

Специальность

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

**Научный руководитель:** д.т.н., профессор

Никитин Петр Васильевич

Москва – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>Глава 1. Методы и средства моделирования процессов взаимодействия гетерогенных потоков с твердой стенкой</b> .....	15
1.1. Применение высокоскоростных гетерогенных потоков в различных отраслях техники.....	15
1.2. Моделирование гетерогенных потоков и их взаимодействие с элементами конструкций.....	23
1.3. Газодинамика гетерогенных потоков.....	37
1.4. Силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу.....	43
<b>Глава 2. Методы и средства диагностики параметров при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой</b> .....	47
2.1. Лазерная доплеровская анемометрия.....	47
2.2. Определение плотности конвективного теплового потока.....	51
2.3. Определение температуры поверхности исследуемого объекта.....	57
<b>Глава 3. Обтекание летательного аппарата конической формы, притупленного сферой, высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком</b> .....	61
3.1. Математическая модель обтекания летательного аппарата конической формы, притупленного сферой, высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком.....	61
3.2. Особенности численного решения математической модели процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.....	70
3.3. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.....	76
<b>Глава 4. Алгоритм расчета определяющих процессов при натекании высокоскоростного полидисперсного гетерогенного потока на плоскую преграду</b> .....	94
4.1. Алгоритм расчёта скорости частиц при натекании сверхзвукового гетерогенного потока на плоскую преграду .....	94
4.2. Алгоритм расчета инерционного движения частиц сверхзвукового гетерогенного потока через ударную волну и сжатый слой .....	98
4.3. Анализ режимов инерционного движения частиц в сжатом слое .....	102
4.4. Динамика удара твердой частицы о поверхность и сопутствующие процессы .....	106

4.5 Анализ особенностей эрозионного разрушения материалов при взаимодействии сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока с твёрдой стенкой.....	117
<b>5. Механизм взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструкционных материалов.....</b>	<b>123</b>
5.1. Анализ особенностей эрозионного разрушения металлических конструкционных материалов при взаимодействии с высокоскоростным гетерогенным потоком .....	125
5.2. Развитие физического механизма эрозионного разрушения металлических конструкционных материалов и сплавов при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков .....	128
5.3. Анализ особенностей разрушения материалов теплозащитного назначения при взаимодействии с высокоскоростным гетерогенным потоком.....	135
Заключение.....	166
Список литературы.....	169

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы диссертации.**

В связи с не прекращаемым развитием и совершенствованием техники постоянно повышаются и требования к самим изделиям, их функциональным возможностям и условиям, в которых они эксплуатируются. Данный факт проявляется в непрерывном увеличении скорости, температуры, агрессивности рабочих сред, чрезмерных механических нагрузок.

Одним из основных факторов, сдерживающих развитие таких отраслей, как энергетическое и транспортное машиностроение, зачастую являются применяемые материалы, а точнее ограничения, связанные с их свойствами. Примером подобных ограничений параметров является эрозионная стойкость конструкционных и теплозащитных материалов при взаимодействии с высокоскоростными гетерогенными потоками [1, 2].

В настоящее время, задачи взаимодействие высокоскоростных гетерогенных потоков с различными конструкциями вошли в разряд проблемных задач машиностроения. К таким задачам относятся:

- борьба с механической эрозией поверхности элементов конструкции высокоскоростных летательных аппаратов при обтекании гетерогенными потоками большой скорости;
- совершенствование технологии механической обработки поверхностей конструкции с использованием высокоскоростных гетерогенных потоков в качестве технологического инструмента;
- дальнейшее развитие технологий формирования разнофункциональных покрытий на поверхностях конструкций с использованием газодинамических методов (высокоскоростных гетерогенных потоков) [1].

Исследование проблемы эрозионного разрушения материалов начались учеными примерно 150 лет тому назад. В тот момент причиной являлось активное развитие горнодобывающей промышленности. Следует обратить внимание, что

результаты исследований в данном направлении привели к увеличению скорости соударения частиц о поверхность элементов конструкции почти до 500 м/с [3].

В газовой поток частицы могут попадать как естественным, так и искусственным путем. Примерами технологий, где используются гетерогенные потоки (поток газа с твердыми или жидкими частицами), являются ракетные двигатели с твердым топливом на металлизированной основе, струйно-абразивная обработка деталей машин, пневмотранспорт сыпучих веществ и т.д. Несмотря на использование современных фильтрационных систем, зачастую не получаются полностью избавиться от присутствия частиц в потоке рабочего тела: конденсированный пар на лопатках в паротурбинных агрегатах электростанций; пыль на лопатках газотурбинных двигателей танков, которая приводит к появлению усталостных напряжений, а со временем и к разрушению поверхностного слоя лопаток.

При высокоскоростном полете в нижних слоях атмосферы приходится преодолевать различные участки с естественными (дождь, снег, град) и искусственными (пыль) образованиями. Данные образования присутствуют как в атмосфере Земли, так и других планет. Даже в чистой атмосфере поверхность спускаемых аппаратов сильно нагревается, в следствии чего происходит термохимическое разрушение внешней тепловой защиты (абляция). При попадании спускаемого аппарата в пылевое (дождевое) облако теплообмен на его поверхности может увеличиваться более, чем на порядок величины, а эрозионное разрушение от высокоскоростных ударов частиц может возрастать на два порядка по сравнению с абляцией. [2, 4, 5, 6, 7, 8]

Решение указанных задач, как правило, осуществляется экспериментально-теоретическими методами.

Задача обтекания тел разных форм высокоскоростными гетерогенными потоками все ещё остается актуальной при эксплуатации в экстремальных условиях изделий авиационной, ракетной и космической техники. Сложность решения такой задачи заключается в том, что она относится к разряду комплексных, многопараметрических задач. В ней тесно сопряжены задачи

термо-газодинамики и тепло-массообмена гетерогенной неизотермической среды, а также механического взаимодействия с обменом импульса дискретной фазы, сопровождающегося процессом эрозии поверхности обтекаемого тела [1].

Обтекание тел гетерогенным потоком осуществляется двумя фазами, газообразной (газ-носитель) и твёрдой (частицы разной дисперсности, «К-фаза»). При высоких скоростях набегающего газового потока содержание в нём даже малой концентрации частиц резко изменяет картину обтекания и вызывает существенное дополнительное разрушение элементов конструкции летательного аппарата. При этом к термохимическому и силовому воздействию на обтекаемое тело газовой составляющей набегающего потока, добавляется термоэрозионное, механическое воздействие дискретной фазы. Все эти газодинамические, тепловые, термохимические и термоэрозионные процессы тесно взаимосвязаны и вблизи поверхности (пограничный слой) обтекаемого тела [2]. Они видоизменяют механизмы термо-газодинамики и энерго-массообмена, а также оказывают влияние непосредственно на ресурс работы конструкции. Например, даже незначительное содержание «К-фазы» в высокоскоростном газовом потоке существенно изменяют режим течения, интенсифицируют теплоотдачу, увеличивают термохимическое разрушение и механическую эрозию поверхности конструкции за счет выброса массы осколков из образовавшихся при ударе кратеров. Последние, обладая значительной скоростью, достигают головной ударной волны, искажая её профиль и перестраивая все поле скоростей газового потока в сжатом и пограничном слое. Прогрев подповерхностных слоев обтекаемого тела влияет на его эрозионную стойкость, прежде всего, на массу выброшенных из кратера осколков и на конвективный теплообмен.

Кроме того, в процессе совместного движения газ-носитель и «К-фаза» обмениваются энергией и импульсом, что может явиться причиной плавления, горения или испарения частиц, то есть различных физико-химических превращений, в результате которых размеры и форма частиц могут измениться [2]. Это также оказывает влияние на режимы течения и обтекания.

Интенсивность механизма взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью конструкции определяется их кинетической энергией. Например, уровень кинетической энергии частиц в момент удара о поверхность обтекаемого тела может привести или к их внедрению в тело конструкции или к эрозии поверхности и выбросу в поток новых встречных частиц. Это усугубляет математическое описание процесса обтекания высокоскоростным гетерогенным потоком конструкции летательного аппарата. Задача описания становится ещё более сложной, поскольку в условиях реального полёта летательного аппарата гетерогенные потоки являются полидисперсными. В таком случае, частицам в потоке свойственно распределение по размерам и массе, что необходимо учитывать при разработке математической модели. Необходимо отметить, что отличительной особенностью эрозионного разрушения в гетерогенных потоках наряду со скоростью соударения является также и многократность соударения. Предполагается, что из-за данных фактов на данный момент не получается связать скорость эрозионного разрушения с каким-либо параметром теории пластичности и упругости [2].

Важным фактом является то, что скорость теплового разрушения поверхности преграды при взаимодействии с гетерогенным потоком, содержание «К-фазы» в котором составит даже 1%, может увеличиться в несколько раз. Необходимо отметить также, что эрозионное разрушение начинается при скорости соударения частиц «К-фазы» о поверхность преграды 100 – 200 м/с. Данная величина значительно ниже порогового значения теплового разрушения для неохлаждаемых металлических конструкций.

Количество исследований эрозионного разрушения резко увеличилось за последние четыре десятилетия [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Интерес к исследованиям эрозионной стойкости материалов как в нашей стране, так и за рубежом особенно повысился за последние 20-25 лет. Такие понятия как «эрозионное разрушение» и «теплообмен в гетерогенных потоках» стали широко использоваться. Под эрозионным разрушением подразумевают процесс уноса

массы какого-либо материала (преграды) под воздействием потока бомбардирующих его частиц.

Основные физические процессы, имеющие место при эрозии, такие как: преобразование относительной кинетической энергии удара в тепловую и кинетическую энергию осколков соударяющихся тел, образование и направление эжекции из кратера, размер и форма кратера и т.д. – наилучшим образом могут быть исследованы на основе единичного удара на баллистических стендах. На данных стендах могут быть точно определены скорость удара, а также масса и форма соударяющихся тел. Поэтому для определения основных закономерностей процесса эрозионного разрушения материалов в гетерогенных потоках, исследователями было предложено деление гетерогенного потока на поток газа-носителя и поток «К-фазы». Соответственно, для этого необходимо было совершенствовать экспериментальные и расчетные методы для изучения соударения одиночных частиц с поверхностью преграды. Все известные экспериментальные и теоретические исследования единичного удара проведены, в основном, применительно к метеоритному повреждению авиационных и космических летательных аппаратов, конструкций солнечных батарей и теплообменников космического назначения и т.п. [2]

При исследовании одиночного удара были получены результаты, которые позволили изучить кинетику установления процесса разрушения, а также определить степень влияние на нее таких параметров как скорость и угол соударения и размер частиц. Естественно, что во все выявленные закономерности входит много эмпирических констант.

Подход деления гетерогенного потока на поток газа-носителя и поток «К-фазы» не позволил получить ответ на все поставленные исследователями вопросы. Так нет единого мнения по конвективному теплообмену в гетерогенных потоках. Одна группа исследователей утверждает, что присутствие частиц в потоке увеличивает коэффициент теплообмена. Другая группа считает, что присутствие частиц в турбулентном пограничном слое должно приводить к снижению скорости и температуры газа-носителя. Также не удалось привести



обоснование разработанных критериев подобия и установлении диапазонов влияния тепловых, силовых и ударно-волновых процессов [2]. Данные факты не позволяют сравнивать результаты экспериментальных исследований, проведенных на различных установках.

В настоящее время, несмотря на то, что приоритет в изучении данной проблемы принадлежит эксперименту, роль математического моделирования непрерывно растет.

**Целью настоящей работы** является исследование процесса взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с элементами конструкции летательного аппарата.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Критический анализ существующих способов моделирования процессов взаимодействия гетерогенного потока с преградой.
2. Критический анализ методов и средств диагностики параметров высокоскоростных гетерогенных потоков.
3. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции летательного аппарата с использованием предложенной математической модели.
4. Исследование механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструкционных материалов.
5. По результатам исследования получение соотношений для расчёта параметров эрозионного разрушения конструкционных материалов.

**Положения, выносимые на защиту.**

Математическая модель газовой фазы и «К-фазы» процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.

Соотношения для расчёта параметров гетерогенного потока в момент удара о преграду.

Зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения, как функции температуры поверхности для некоторых теплозащитных материалов.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач и достижения указанной цели в работе использован экспериментально-теоретический метод исследования механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью отдельных конструкционных материалов. При этом концепция экспериментального метода базировалась на обработке и анализе стендовых экспериментах данных, полученных с имитацией натуральных условий. Для проведения вычислительных экспериментов использовались компьютерные технологии - программный комплекс Ansys CFX.

**Научная новизна** работы выражается в том, что:

- предложена математическая модель процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции ЛА конической формы, притупленного сферой. С использованием предложенной модели проведено численное моделирование процесса обтекания гетерогенным потоком поверхности конструкции высокоскоростного ЛА;

- предложены алгоритмы расчёта скорости частиц в сверхзвуковом полидисперсном гетерогенном потоке и инерционного движения частиц сверхзвукового полидисперсного гетерогенного потока через ударную волну и сжатый слой;

- получены зависимости для расчёта скорости частиц разной дисперсности в гетерогенном потоке, вызывающей эрозию поверхности материала в момент удара о преграду, и температуры в зоне контакта при ударе высокоскоростных частиц полидисперсного гетерогенного потока о преграду.

**Теоретическая ценность** работы заключается в том, что составлена математическая модель взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструкционных материалов. Предложен метод её численного решения при заданных граничных условиях.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что получены соотношения для расчёта параметров эрозионного разрушения ряда

конструкционных материалов, которые могут быть использованы при проектировании высокоскоростных ЛА. Получены характеристики эрозионного разрушения некоторых конструкционных материалов.

**Достоверность и обоснованность результатов** работы подтверждаются удовлетворительным совпадением результатов численного решения с использованием предложенной математической модели, с данными стендовых экспериментов, и с тестовыми расчётными данными других авторов, полученными при прочих равных начальных условиях.

**Личный вклад соискателя:**

– расчётно-теоретическое исследование механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью ряда конструкционных материалов;

– разработка математической модели процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции летательного аппарата конической формы, притупленного сферой;

– с использованием предложенной математической модели проведение численного моделирования процесса обтекания гетерогенным потоком поверхности конструкции высокоскоростного летательного аппарата конической формы, притупленного сферой;

– предложены алгоритмы и получены зависимости, позволяющие рассчитать параметры эрозионного разрушения при воздействии высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью ряда конструкционных материалов.

**Апробация работы:**

Основные положения диссертационной доложены на научно-технических конференциях:

а) II Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем» (Москва, Россия, 21-22 ноября 2013г.);

б) «16-я Научно-техническая конференция по аэродинамике» (п. Володарского, Россия, 26-27 февраля 2015г.)

- в) 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2015» (Москва, Россия, 16-20 ноября 2015г.);
- г) Всероссийская научно-техническая конференции «Авиадвигатели XXI века» (Москва, Россия, 24-27 ноября 2015г.);
- д) «Одиннадцатая Международная конференция по Неравновесным процессам в соплах и струях» (Оздоровительно-учебный центр МАИ «Алушта», Россия, 25 - 31 мая 2016г.).

**По теме диссертации опубликовано 6 работ из них 2 в рецензируемых научных изданиях.**

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по работе и списка литературы; содержит 176 страниц, 82 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 87 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи работы. Изложены новизна работы, предмет исследования, степень разработанности проблемы. Кратко охарактеризованы методы исследования. Показана теоретическая и практическая значимость работы. Описана структура и объем работы, указаны публикации по теме исследования.

**В первой главе** диссертационной работы представлены примеры применения высокоскоростных гетерогенных потоков в различных отраслях техники, способы моделирования гетерогенных потоков и их взаимодействия с элементами конструкций, описаны силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу.

**Во второй главе** описаны методы и средства диагностики параметров при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой.

**В третьей главе** представлена математическая модель процессов термогазодинамики и тепло-массообмена на поверхности ЛА, основанная на решении дискретных аналогов системы уравнений Навье–Стокса и уравнений дополнительных моделей. Данная математическая модель позволяет определять значения параметров гетерогенного потока только на основании известных геометрических характеристик ЛА и параметрах набегающего гетерогенного

потока. Также продемонстрировано численное моделирование процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.

**В четвертой главе** проведён анализ термо-газодинамики течения сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока при натекании на плоскую преграду. Предложен алгоритм расчёта скорости частиц в сверхзвуковом полидисперсном гетерогенном потоке. Также разработан алгоритм расчета инерционного движения частиц сверхзвукового полидисперсного гетерогенного потока через ударную волну и сжатый слой. В результате анализа полученных расчётных данных установлены возможные режимы взаимодействия сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока с плоской преградой в зависимости от размеров частиц «К-фазы» и их плотности. Показано, что все частицы субмикронного диапазона не достигают поверхности преграды и сносятся вниз по потоку, то есть не взаимодействуют с поверхностью. Получены зависимости для расчёта скорости частиц разной дисперсности и температуры в зоне контакта при ударе высокоскоростных частиц полидисперсного гетерогенного потока о преграду.

**В пятой главе** проведён анализ физической модели процессов взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью преграды. Установлено наличие пороговых значений скорости частиц и температуры, при достижении которых реализуется резкое увеличение интенсивности их эрозионного разрушения. Рекомендованы соотношения для их оценки. Рассчитаны зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения, как функции температуры поверхности для некоторых теплозащитных материалов. Эти данные могут быть использованы при расчёте термоэрозионного разрушения ТЗ элементов конструкции высокоскоростных ЛА. Проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния угла падения частиц (угла атаки) сверхзвукового высокотемпературного гетерогенного потока на обрабатываемую поверхность плотного поликристаллического графита В-1.

**В заключении** формулируются основные результаты диссертационной работы и выводы, следующие из представленных результатов.

# **ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ С ТВЕРДОЙ СТЕНКОЙ**

Гетерогенные потоки широко используются в различных отраслях промышленности для решения конкретных проблемных задач. Особенно остро стоит задача механической эрозии конструкций высокоскоростных ЛА при взаимодействии с гетерогенными средами (дождевая, пылевая облачность, натекание высокоскоростных струй на конструкцию ЛА при истечении струи из РДТТ).

В данной главе проводится анализ применения высокоскоростных гетерогенных газовых потоков и методов их математического моделирования при решении задач взаимодействия с твердой поверхностью.

## **1.1. Применение высокоскоростных гетерогенных потоков в различных технологиях промышленного машиностроения**

Проведем оценку режимов работы известных установок транспортного и энергетического машиностроения. Для этого сравним их основные тепловые и эрозионные параметры. В качестве тепловых параметров можно использовать такие характеристики как: плотность конвективного теплового потока, обусловленная обтеканием стенки газовой фазой, или температуру торможения (восстановления) набегающего газового потока. В качестве эрозионных параметров - кинетическую энергию частиц набегающего на стенку гетерогенного потока или скорость взаимодействия частиц со стенкой.

На рисунках 1.1 ÷ 1.6 представлены схемы, а на рисунке 1.7 основные режимные параметры взаимодействия гетерогенных потоков со стенками или другими элементами конструкций в транспортных системах и энергетическом оборудовании [19].

В этой связи на рисунках из опубликованных данных представлены, с одной стороны, типичные, используемые в технологиях параметры гетерогенных потоков, а с другой, предельные по параметрам варианты естественных природных двухфазных сред в виде дождевых или пылевых образований. Например, в качестве таких вариантов представлены технологии производства, в которых скорости взаимодействия частиц с поверхностью тела составляют несколько метров в секунду (пневмотранспорт, рисунок 1.1). Представлены также и экстремальные значения скоростей – от нескольких километров в секунду при полёте гиперзвуковых ЛА в запыленной атмосфере до десятков километров в секунду при взаимодействии микрометеоритов с поверхностями защитных экранов космических аппаратов (рисунок 1.6).

Кроме того, на рисунках представлен широкий спектр других параметров (например, температур), при которых реализуется взаимодействие гетерогенных потоков с конструкцией. Например, на рисунке 1.2 струйно-абразивная обработка деталей машин осуществляется при нормальных (комнатных) температурах. На рисунке 1.5 процесс взаимодействия атмосферных жидких или твёрдых образований с поверхностью возвращаемого космического аппарата, совершающего вход в плотные слои атмосферы с гиперзвуковой скоростью, реализуется при очень высоких температурах – несколько тысяч градусов.

### ***1.1.1. Использование гетерогенных потоков в пневмотранспорте и в струйно-абразивной обработке деталей конструкций***

При движении наземного транспорта в запыленной атмосфере как твердыми, так и жидкими частицами [20], а также при эксплуатации магистралей пневмотранспорта [21] наблюдаются самые низкие скорости гетерогенных потоков –  $V_p = 20 \div 50$  м/с (рисунок 1.1).



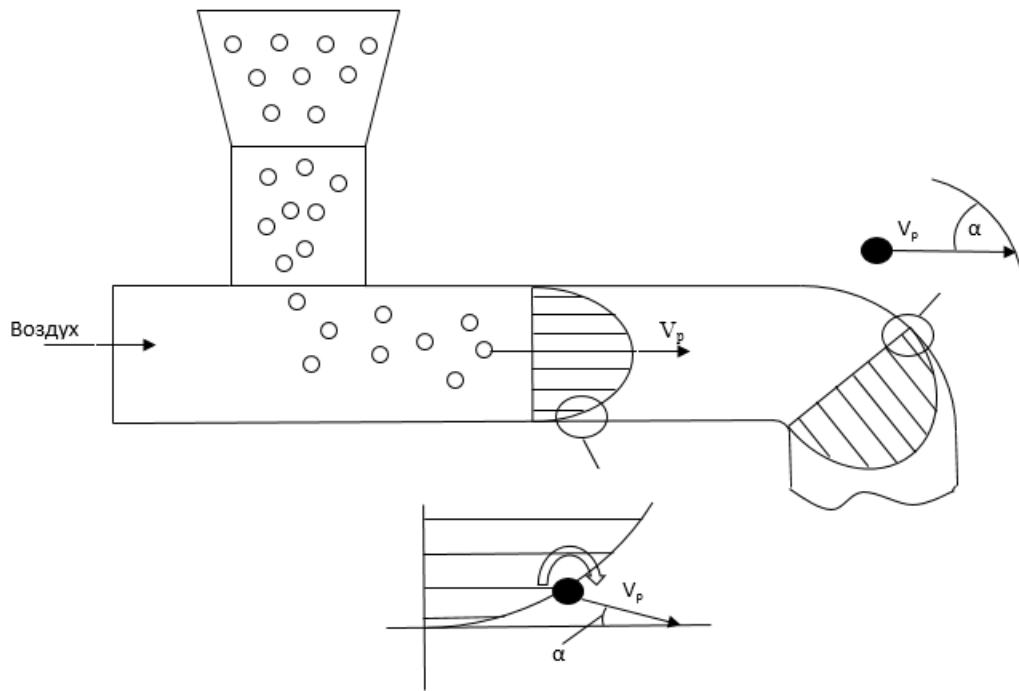


Рисунок 1.1. Схема взаимодействия твёрдых частиц при пневмотранспортировке газифицированного синтетического топлива

При струйно-абразивной обработке деталей машин уровень скоростей гетерогенных потоков достигает  $V_p = 100 \div 140$  м/с, а углы соударения частиц о поверхность –  $\alpha = 30 \div 90^\circ$  [22] (рисунок 1.2).

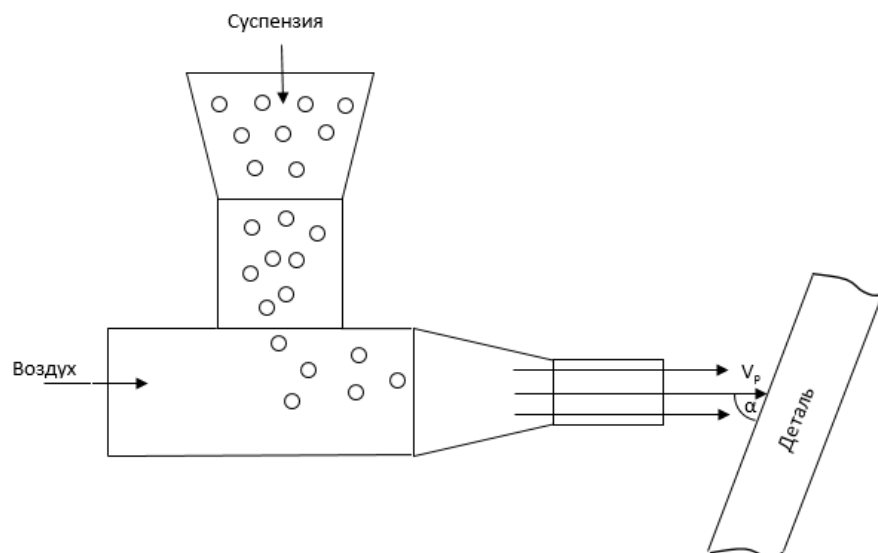


Рисунок 1.2. Схема струйно-абразивной обработки деталей машин

### 1.1.2. Использование гетерогенных потоков в авиационной и ракетной технике

Лопатки газотурбинных установок работают в более жестких условиях, так как скорость соударений жидких или твердых частиц о поверхность лопаток достигает  $V_p = 500 \div 700 \text{ м/с}$  при углах атаки частиц  $\alpha = 0 \div 90^\circ$  (рисунок 1.3) [11, 23].

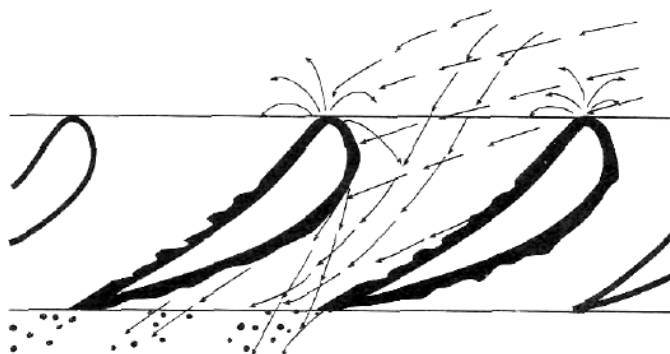


Рисунок 1.3. Схема взаимодействия потоков крупнодисперсных капель воды с сопловыми решётками паровых турбин

Ещё более интенсивно подвергаются воздействию гетерогенных потоков поверхности элементов конструкций воздушных летательных аппаратов: кромки воздухозаборников, винты вертолетов, лопатки турбореактивных двигателей и др. Скорости взаимодействия частиц с поверхностью в таких условиях могут достигать значений  $V_p = 1000 \div 1200 \text{ м/с}$  при углах атаки  $\alpha = 40 \div 90^\circ$ .

При этом максимальный уровень температур газа-носителя в данных потоках таков, что материалы, из которых изготовлены элементы конструкций не разрушаются. В результате появления при полёте ЛА атмосферных образований, таких как дождь, снег, град, пыль возникает интенсивная эрозия элементов конструкции ЛА, которая может не только повлиять на режимные параметры аппаратов, но в ряде случаев значительно сократить ресурс их работы или даже вызвать аварийную ситуацию.

В ещё более жестких условиях термоэрозионного воздействия гетерогенных высокотемпературных сверхзвуковых струй ракетных твёрдотопливных двигателей [24] работают элементы сверхзвуковых сопел

(рисунок 1.4) [25]: критическое сечение, стенки выходных устройств. Например, при взаимодействии гетерогенного потока со стенками в критическом сечении уровень скоростей частиц в нем достигает значений  $V_p = 1000 \text{ м/с}$  при температуре потока  $T_g = 3500 \div 4000 \text{ К}$ .

Кроме того, жидкие частицы окислов металлов, содержащиеся в топливе и достигающие в камере сгорания размеров до  $d_p = 40 \div 50 \text{ мкм}$ , при течении в критическом сечении сопла разрушаются до дисперсии  $d_p \approx 4 \div 10 \text{ мкм}$ . Скорости частиц в данных гетерогенных потоках на выхлопных кромках сверхзвуковых раструбов достигают значений  $V_p = 2000 \div 2500 \text{ м/с}$  при статических температурах газа-носителя гетерогенного потока до  $T_g = 1000 \div 1500 \text{ К}$  и углах взаимодействия частиц «К-фазы» со стенкой до  $\alpha = 3 \div 8^\circ$ .

Нахождение частиц гетерогенного потока в жидком состоянии в трансзвуковой части сопла может приводить к их осаждению и налипанию на внутреннюю поверхность каналов. При данном взаимодействии частица при отвердевании выделяет тепло, что приводит к дополнительному нагреву стенок данных каналов.

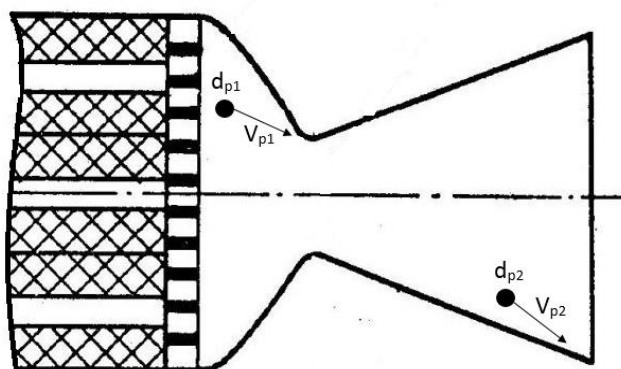


Рисунок 1.4. Схема взаимодействия со стенкой сопла жидких частиц окислов металлов, содержащихся в продуктах сгорания металлизированных топлив ЖРД и РДТТ

Наиболее жестким условиям с точки зрения термоэрозионного воздействия подвергаются теплозащитные покрытия возвращаемых космических аппаратов, которые при полёте в атмосфере с гиперзвуковой скоростью преодолевают естественные атмосферные образования – облачность с частицами дождя, снега,

льда (рисунок 1.5) [2]. При этом уровень траекторных параметров космических летательных аппаратов, таких как скорость, температура и давление, достигает экстремальных значений:  $V_{\infty} = 5000 \div 7000 \text{ м/с}$ ,  $T_0 \approx 5000 \div 7000 \text{ К}$ ,  $P_0 \approx 1 \div 10 \text{ МПа}$  - соответственно. Задача усложняется, поскольку жидкие или твердые частицы размером от нескольких микрометров до нескольких миллиметров взаимодействуют с поверхностью аппарата в широком диапазоне углов атаки - от нескольких до 90 градусов. При таких режимах обтекания термоэрозионное разрушение теплозащитного покрытия (ТЗП) происходит со значительными скоростями, что, с одной стороны, вызывает изменение его аэродинамического профиля, а с другой - вызывает образование переменного температурного поля на его поверхности. В результате, частица при ударе взаимодействует с материалом, имеющим переменную во времени температуру. Поэтому с целью установления нестационарного температурного поля на поверхности аппарата, определяющего тепловое состояние поверхностного слоя и его термоэрозионную стойкость, приходится решать весьма сложную, многопараметрическую сопряжённую задачу.

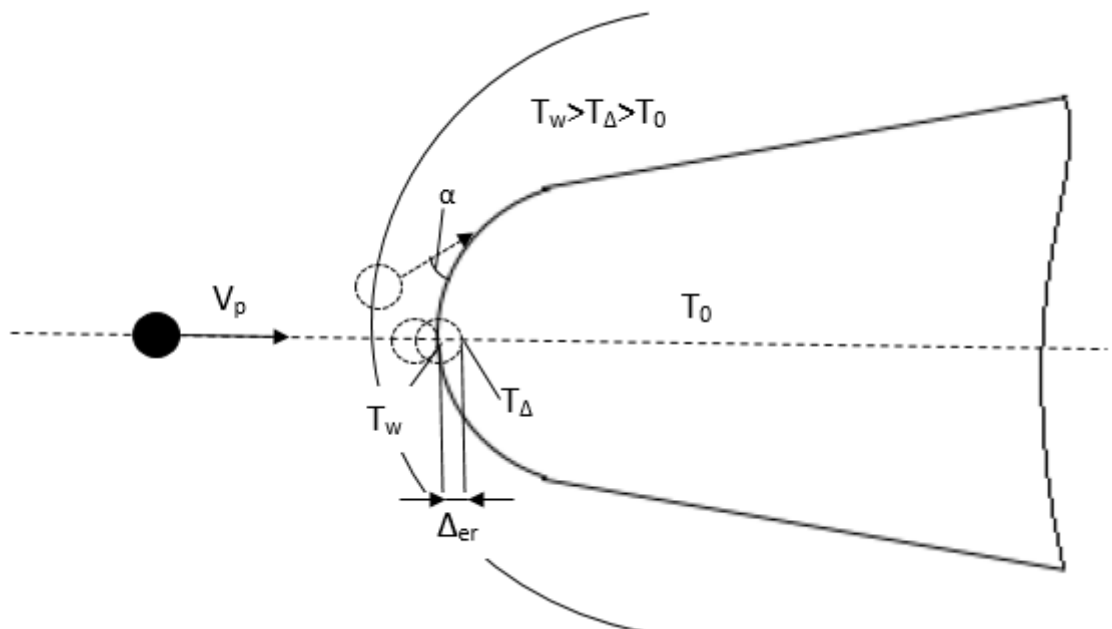


Рисунок 1.5. Схема взаимодействия частиц атмосферных образований с поверхностью спускаемых космических аппаратов

При столкновении в глубоком космическом пространстве космических летательных аппаратов (КЛА) с метеоритами реализуется наибольшая скорость

(десятки км/с) соударения частиц с поверхностью элементов конструкции КЛА [26]. Вследствие инерционности процессов отвода тепла, удар частиц о поверхность тела с такой скоростью приводит к выделению на его поверхности колоссальных удельных энергий, что вызывает не только механическое (эрозионное) разрушение конструкции, но процессы интенсивного плавления и даже испарения её материала в области образующегося кратера. Это явление обусловлено соизмеримостью времени ударной трансформации кинетической энергии частиц в тепловую энергию поверхностного слоя со временем релаксации тепловых процессов в материале преграды [2].

При столкновении частицы с противометеоритной защитой космических летательных аппаратов, которая зачастую состоит из одного или нескольких тонких металлических экранов, происходит разрушение как частицы, так и экранов (рисунок 1.6). Частица при этом теряет кинетическую энергию.

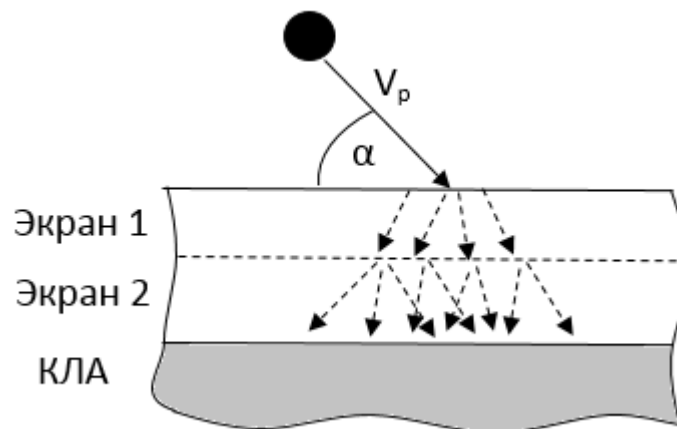


Рисунок 1.6. Схема взаимодействия микрометеорита с экранами противометеоритной защиты космических летательных аппаратов

### ***1.1.3. Возможные диапазоны энергетических режимов частиц в гетерогенных потоках***

Диаграмма, иллюстрирующая области взаимодействия гетерогенных потоков с поверхностью обтекаемых тел в зависимости от температуры набегающего потока и скорости соударения частиц, представлена на рисунке 1.7.

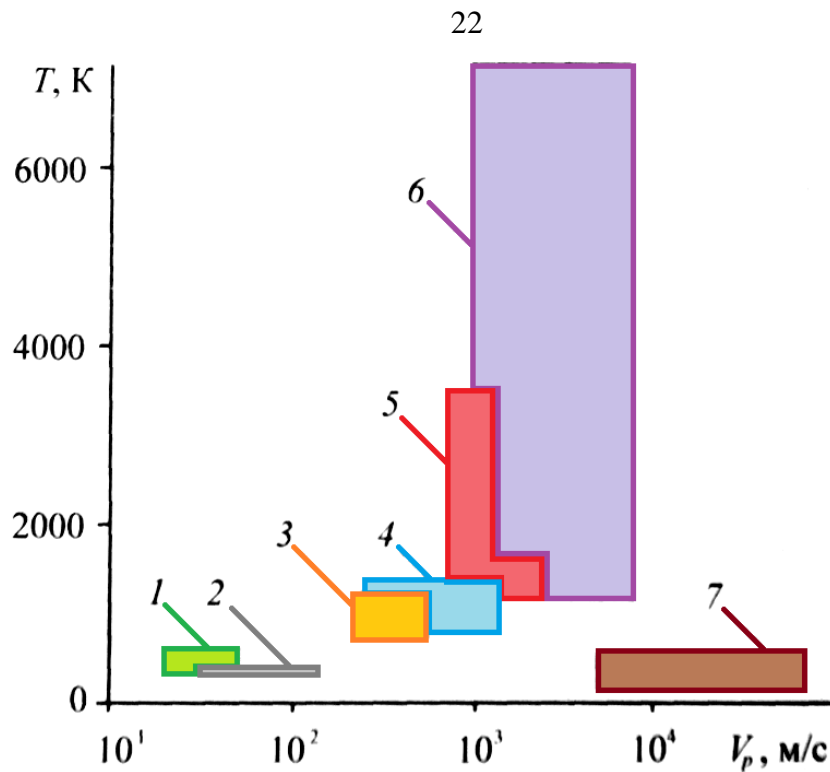


Рисунок 1.7. Диаграмма изменения температуры газа и скорости частицы для различных возможных устройств, систем и их элементов

Как уже отмечалось, особый интерес представляет область параметров, при которых поверхность конструкции подвергается интенсивной эрозии (разрушению).

Дополнительные параметры возможных вариантов взаимодействия гетерогенных потоков с поверхностями обтекаемых тел, такие как размеры частиц, их концентрации, агрегатное состояние, углы взаимодействия и т.д., сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Тип	Устройства, системы, их элементы	Возможные параметры воздействия гетерогенных потоков					
		$V_p$ , м/с	$d_p$ , мкм	Физическое состояние частиц	$\alpha$ , град	Массовая концентрация частиц, %	Температура газа-носителя $T_g$ , К
1	Пневмотранспорт, в т.ч. газифицированного синтетического топлива	20 – 50	До 100	Твёрдые	До 90	До 2 - 3	500 – 600
2	Струйно-абразивная обработка деталей машин	30 – 150	5 – 500	Твёрдые СОЖ	0 – 90	До 35	300
3	Лопатки парогазотурбинных установок	500 – 700	До 1000	Твёрдые, жидкие	До 90	До 5	800 – 1200

Тип	Устройства, системы, их элементы	Возможные параметры воздействия гетерогенных потоков					
		$V_p$ , м/с	$d_p$ , мкм	Физическое состояние частиц	$\alpha$ , град	Массовая концентрация частиц, %	Температура газа-носителя $T_g$ , К
4	Лобовые поверхности воздушных ЛА, кромки винтов вертолетов, воздухозаборников	1000 – 1200	До 1000	Твердые, жидкие	40 – 90	До 3	800 – 1200
5	Стенки каналов МГД-генераторов сопел ракетных двигателей на металлизированных топливах	До 1000 2000 – 2500	40 – 50 4 – 10	Жидкие Жидкие	До 45 До 10	До 40 До 40	3500 – 4000; 1000 – 1800
6	Лобовые поверхности ЛА, спускаемых в атмосфере с образованием в виде дождя, снега, льда ( $P'$ до 10 – 18 МПа)	До 7000	До 3000	Твердые, жидкие	До 90	До 5	5000 – 7000
7	Столкновение микрометеоритов с астероидами, малыми планетами и КА	До 100000	До 10	Твердые	До 90	Единичный удар	–

## 1.2. Моделирование гетерогенных потоков и их взаимодействие с элементами конструкций

Возможности моделирования гетерогенных потоков в лабораторных условиях однозначно связаны с решением вышеуказанных проблемных задач.

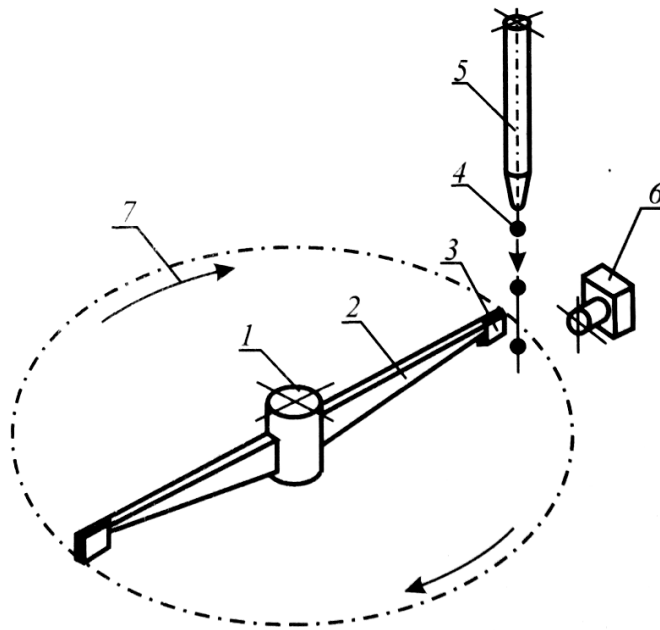
### 1.2.1. Возможности моделирования гетерогенных потоков при решении задачи взаимодействия с элементами конструкции ракетной техники

Моделирование гетерогенных потоков с уровнями характерных параметров, соответствующими устройствам 1 и 2 типов (описанных выше в таблице 1.1), не представляет технических сложностей. Поэтому данная задача сводится к правильному выбору рабочих режимов [22, 27], а именно таких параметров как: скорость частиц в гетерогенном потоке, угол соударения, концентрация частиц,

их характерный размер, их форма, их физико-механические свойства и др. Процесс моделирования производится на исследовательских стендах и, как правило, в широком диапазоне изменения параметров.

Воспроизведение характерных параметров на уровне устройств 3 и 4 типов (таблица 1.1) уже требует разработки специальных стендов. Наиболее подходящий и часто используемый вариант – это центрифуги [11, 27], так как являются наиболее простыми в эксплуатации установками. Существует два вида данных установок:

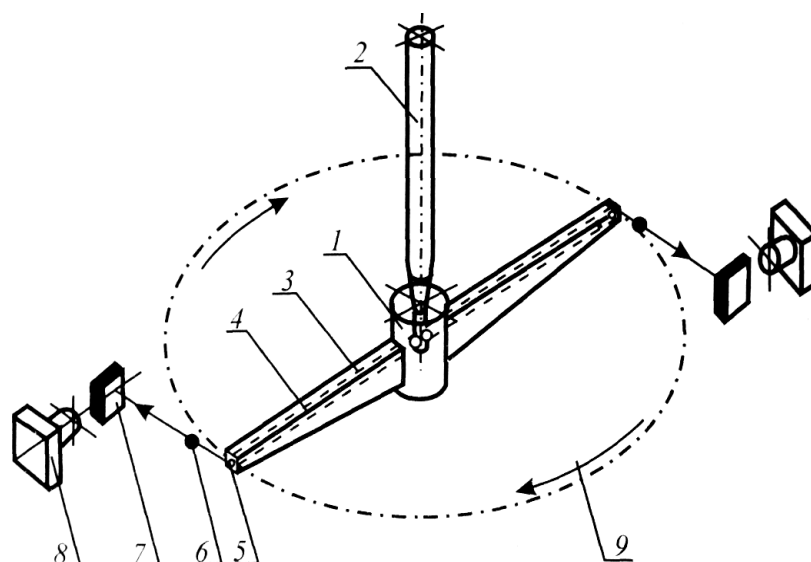
- центрифуги, в которых модель исследуемого объекта вращается на коромысле (рисунок 1.8);
- центрифуги, в которых частицы разгоняются центробежными силами и соударяются с образцами, установленными на внутренней поверхности барабана центрифуги (рисунок 1.9).



*1 – ось с электродвигателем, 2 – коромысло, 3 – образец, 4 – жидкая или твердая частица,  
5 – питатель, 6 – регистрирующая аппаратура, 7 – направление вращения*

Рисунок 1.8. Схема стенда с использованием вращения исследуемых образцов





1 – ось с электродвигателем, 2 – питатель, 3 – коромысло, 4 – канал для подвода частиц к форсунке, 5 – форсунка, 6 – частица, 7 – образец, 8 – регистрирующая аппаратура, 9 – направление вращения

Рисунок 1.9. Схема стенда с использованием центробежного ускорения частиц

Установки по типу центробежные ускорители дают надежные и устойчивые результаты до скоростей  $V=200 \div 500$  м/с. Они могут достаточно точно моделировать необходимые уровни основных параметров, таких как: скорость и угол взаимодействия, размер, форму и физическое состояние воздействующих частиц.

При использовании указанной на рисунке 1.9 установки следует иметь в виду, что вращение ротора создаёт поток газа, в рабочей камере центрифуги. В этой связи траектории движения частиц искажаются. Для устранения этого эффекта рабочую камеру вакуумируют.

Также, следует иметь в виду, что частицы, ускоряясь внутри радиальных каналов ротора, соударяются со стенками ротора под воздействием сил Кориолиса и дробятся на более мелкие фракции. Еще одним недостатком данного типа установок является сложность подогрева исследуемого объекта.

К недостаткам также можно отнести невозможность моделирования на стендах данного типа газодинамики течения газа вблизи передней лобовой точки ЛА.

Воспроизведение характерных параметров процессов взаимодействия продуктов сгорания металлизированных топлив с поверхностями стенок сопел ракетных двигателей и крупноразмерных каналов МГД-генераторов (позиция 5 таблицы 1.1), как правило, осуществляется на стендах, которые являются маломасштабной копией реальной установки (возможно некоторое упрощение). Однако некоторые особенности данных процессов, связанные с масштабным фактором (например, «жгутование» частиц в потоке), могут быть изучены только на полномасштабных установках.

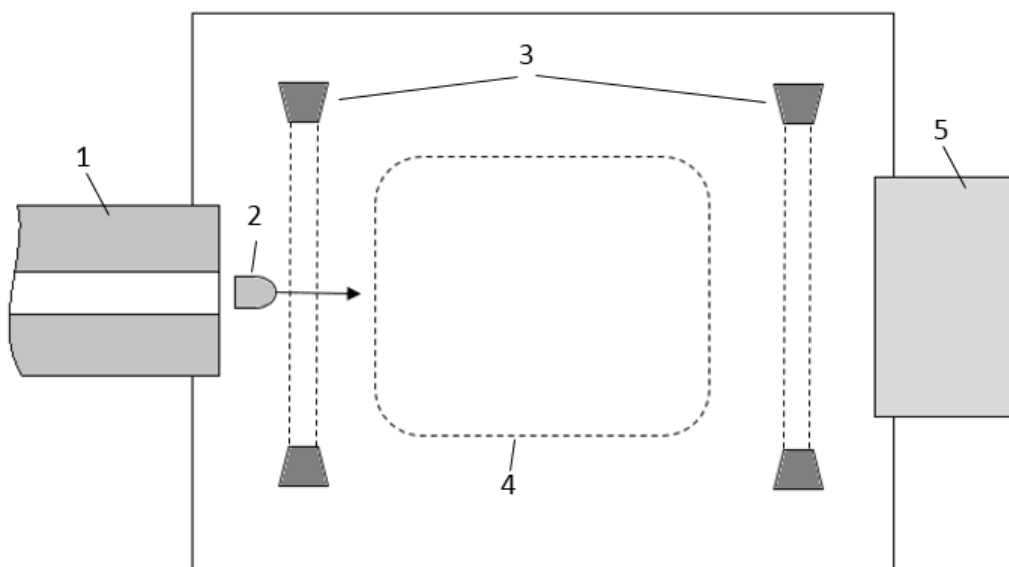
Наличие верхнего предела энергетических возможностей наземных установок ограничивает уровни воспроизводимых характерных параметров гетерогенных потоков. По этой причине нет возможности для проведения в полном объеме моделирования спуска в атмосфере ЛА на земле. Также невозможно и исследование отработки материалов и элементов конструкции в летных испытаниях.

Данными причинами, а также вследствие многофакторности исследуемого процесса, объясняется существование испытательных стендов, основанных на использовании различных физических принципов. Использование таких установок позволяет исключить систематические погрешности, а также изучить механизмы разрушения материалов и степени влияния отдельных факторов на эти механизмы.

В связи с вышесказанным, проведём анализ принципиальных особенностей некоторых типов испытательных стендов: баллистических, центробежных, газодинамических.

Для изучения процесса эрозионного разрушения при взаимодействии поверхности исследуемого объекта с гетерогенными потоками, содержащими дождевые образования и крупные твердые частицы ( $d_p > 0,5$  мм), чаще всего используют баллистические установки или установки прямого воздействия [28, 29]. Данные установки есть не что иное, как метательные системы с баротрассой и регистрирующей аппаратурой.

Принцип работы баллистической установки с прямой схемой воздействия состоит в том, что модель исследуемого объекта, ускоряется с помощью пушки, затем преодолевает последовательно зону с измерительной аппаратурой, зону, в которой моделируется гетерогенная среда, снова попадает в зону с измерительной аппаратурой, а затем в систему улавливания модели (рисунок 1.10). Данное моделирование является наиболее приближенным к реальным условиям, в которых функционируют исследуемые объекты. Значительным недостатком данного типа стендов является невозможность точной оценки интенсивности эрозионного разрушения. Данная проблема возникает из-за несовершенства систем улавливания, которые и вносят большие погрешности.



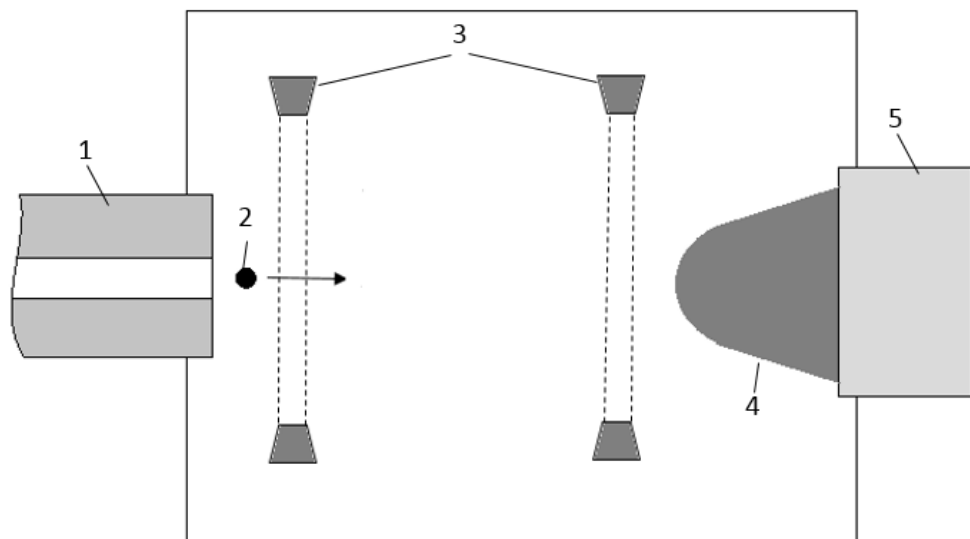
*1 – пушка, 2 – модель, 3 – системы измерения скорости модели, 4 – барокамера с имитаторами жидких или твердых частиц, 5 – уловители модели*

Рисунок 1.10. Схема баллистического стенда с подвижной моделью

Одним из основных, и в тоже время наиболее серьезных недостатков баллистических установок является снижение скорости выстреливаемой модели вследствие влияния на нее силы сопротивления среды. Для уменьшения аэродинамического торможения исследуемой модели вдоль траектории ее движения баллистические трассы вакуумируют. Однако данный способ снижает, и аэродинамический нагрев, что, в свою очередь, исключает возможность изучения процессов совместного теплового и эрозионного воздействия гетерогенного

потока на модель. Также к основным недостаткам данного типа установок относят малое время испытания.

Принцип работы баллистической установки при обращенной схеме воздействия (рисунок 1.11) заключается в том, что испытуемая модель неподвижна, а частицы, изначально закрепленные на поршне, ускоряются вместе с ним в стволе станда. В конце разгонного участка поршень резко тормозится, частицы отрываются от него и продолжают движение по инерции до столкновения с исследуемой моделью. Для уменьшения аэродинамического торможения частиц также применяется вакуумирование баротрассы, что приводит к исключению возможности изучения процессов совместного теплового и эрозионного воздействия гетерогенного потока на модель.



*1 – пушка, 2 – частица или сгусток частиц, 3 – система измерения скорости частицы,  
4 - модель*

Рисунок 1.11. Схема баллистического стенда с высокоскоростными частицами

Существует множество методов предварительного нагрева, перечислим основные: радиационный, электронным или лазерным лучом, омический и т.д. Но все они обладают данными недостатками:

1) так как при предварительном нагреве до температур свыше  $T=450\div 550\text{ K}$  происходит термодеструкция органического связующего и исследование термоэрозионной стойкости происходит не в штатном режиме, они не позволяют исследовать композиционные материалы на органическом связующем;

2) невозможность моделирования высоких штатных значений градиента температуры в поверхностном слое исследуемой модели.

Для изучения механизма эрозионного разрушения материалов и их свойств нашли также применение, так называемые, «ракетные трассы» [29]. На таких стендах исследуемые модели разгоняются вдоль монорельса, например, ракетным двигателем, затем попадают в зону моделирования эрозионного воздействия после чего тормозятся.

К основным недостаткам данного вида стендов относят:

1) ограничение по максимальной скорости по причине возникновения проблем торможения и спасения исследуемой модели;

2) конечные размеры длины трассы, соответственно, и значительное уменьшение времени испытания.

Перечисленные недостатки не позволяют использовать «ракетные трассы» для решения задач термоэрозионных исследований.

Следующий тип стендовых установок – газодинамические стенды. Они являются установками обращенного воздействия. Основной принцип работы газодинамического стенда заключается в том, что исследуемая модель взаимодействует с высокотемпературным гетерогенным потоком, который получается в результате ускорения газом-носителем в сопловом тракте твердых тугоплавких частиц. Частицы заданной дисперсности с определенным расходом вводятся в форкамеру газогенератора, а испытуемый объект располагается по оси высокотемпературного гетерогенного потока. В случае применения сверхзвукового гетерогенного потока перед исследуемой моделью образуется отошедшая головная ударная волна. Параметры высокоскоростного гетерогенного потока, а именно частиц и газа-носителя, (гетерогенного потока), обтекающего поверхность испытуемой модели, имитируют штатные условия работы изделия. [2]

Приведем различные схемы высокотемпературных газодинамических стендов с химическим подогревом рабочего тела:

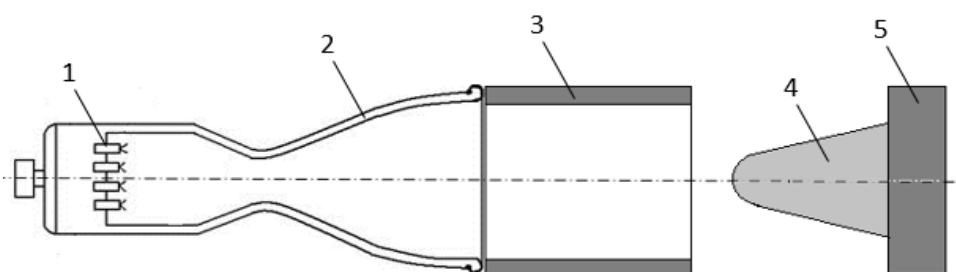
- на жидких или газообразных компонентах топлива (рисунок 1.12);

- с использованием твердого топлива (рисунок 1.13);
- с электродуговым подогревом (рисунок 1.14).

Через равномерно расположенные форсунки в форсуночном днище жидкие и газообразные топливные компоненты, а также тугоплавкие частицы могут вводиться в форкамеру. Затем образуемый гетерогенный поток разгоняется в сопловом тракте. Исследуемый объект располагается на оси экспериментальной установки на определенном расстоянии от среза сопла.

В твердое топливо частицы могут подмешиваться непосредственно при его изготовлении.

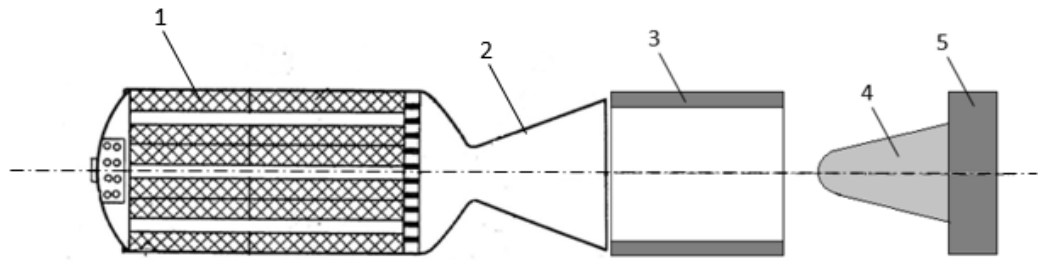
На экспериментальных установках с электродуговым подогревом газа зачастую используют плазмотроны с вихревой стабилизацией дуги. Недостатком данного метода является неравномерность распределения частиц по потоку из-за воздействия на них центробежных сил. Поэтому зачастую на данных стендах, перед тем как частицы вводятся в поток, они попадают в специальные успокоительные камеры.



*1 – форсунки для ввода химических компонентов и частиц, 2 – сопло, 3 – цилиндрический насадок, 4 – образец изучаемого материала, 5 – державка*

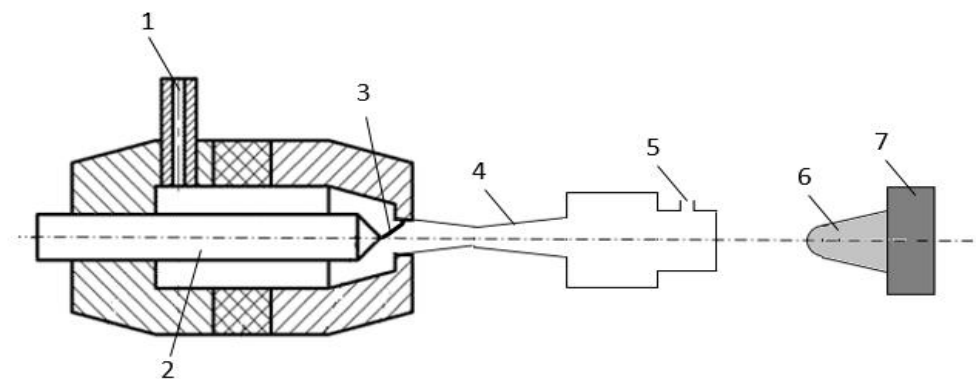
Рисунок 1.12. Схема стенда с химическим подогревом на основе жидких или газообразных компонентов для создания высокотемпературных гетерогенных

ПОТОКОВ



*1 – твердый компонент топлива с тугоплавкими частицами, 2 – сопло, 3 – цилиндрический насадок, 4 – модель, 5 – державка*

Рисунок 1.13. Схема стенда с химическим подогревом на основе твердых компонентов для создания высокотемпературных гетерогенных потоков



*1 – ввод рабочего газа, 2 – катод, 3 – дуга, 4 – сопло, 5 – ввод тугоплавких частиц, 6 – модель, 7 – державка*

Рисунок 1.14. Схема стенда с электродуговым подогревом газа

Газодинамические стенды позволяют моделировать стационарные условия воздействия, что является их основным достоинством. Данный факт особенно значим при исследовании следующих задач:

- оценка теплового воздействия гетерогенного потока;
- исследование механизмов разрушения и изменения формы испытуемого объекта;
- изучение влияния теплофизических и теплопрочностных характеристик материала испытуемого объекта и частиц на скорость эрозионного разрушения.

Главный недостаток газодинамических стендов кроется в принципе работе данной установки, а именно в воздействии высокоэнергетического потока газоносителя на частицы. Вследствие чего частицы нагреваются, соответственно,

могут ухудшиться их прочностные характеристики, частицы могут оплавиться и даже разрушиться (испариться).

Кроме того, различная инерционность крупных и мелких частиц осложняет использование газодинамического принципа разгона полидисперсных смесей.

Также существуют ограничения по максимальному размеру частиц при необходимости их ускорения до сверхзвуковых скоростей [2]:

- максимальный размер твёрдых частиц в зависимости от мощности стенда составляет  $0,7 - 2,54$  мм;

- максимальный размер жидких частиц, вследствие их разрушения при больших числах Вебера в критическом сечении разгонного тракта,  $4 - 10$  мкм.

На газодинамических стендах удобно реализовывать последовательный (раздельный) метод теплового и эрозионного воздействия на исследуемые образцы. Например, термохимическое разрушение материалов можно проводить путём предварительного нагрева газа до необходимой температуры и воздействовать таким потоком на исследуемый образец. Далее, получив таким образом характеристики термохимического разрушения материала, образец того же материала можно испытать при воздействии высокоскоростным гетерогенным потоком, включающим твёрдые частицы. По результатам проведенных испытаний определяются параметры как термохимического, так и термоэрозионного разрушения исследуемого материала.

Газодинамические стенды также позволяют воспроизводить тепловое и эрозионное разрушение исследуемого образца одновременно. Одним из таких примеров является газодинамическая установка, где частицы разгоняются легким газом в специальном сопле [31].

А основной высокотемпературный поток газа-носителя создается плазматроном. Затем разогнанные частицы вводятся в основной поток газа-носителя в районе среза сопла плазматрона. Далее полученный гетерогенный поток воздействует на испытываемую модель.

Применение подобных стендов ограничивает их сложность как конструктивная, так и сложность в получении гетерогенного потока с



определенными параметрами. Конструктивная сложность заключается в необходимом наличии двух газогенераторов. Параметры гетерогенного потока определяются на этапе перемешивания двух потоков. Проблема организации данного процесса связана с тем, чтобы отсечь струю легкого газа, который разгоняет частицы, не допустить сепарации частиц полидисперсного состава, исключить угол между направлением движения частиц, осью высокотемпературного газового потока и осью образца испытываемого материала [2].

Также к недостаткам данного типа стендов следует отнести то, что частицы слабо нагреваются, так как вводятся в область с низкой статической температурой основного потока газа-носителя.

Наличие такого количества недостатков практически исключило применение в настоящее время данных стендов для исследования термоэрозионной стойкости материалов.

На данный момент более простыми и популярными типом экспериментальных установок для изучения взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью исследуемого объекта являются газодинамические установки с электродуговыми нагревателями [32], либо химическими газогенераторами. На данных стендах в качестве частиц используются тугоплавкие окислы, которые вводятся в форкамеру установок.

К основным достоинствам газодинамических установок с электродуговыми нагревателями можно отнести:

- высокоэнтальпийность создаваемого гетерогенного потока;
- большое время работы на стационарном режиме;
- дешевизна эксплуатации.

Все вышеперечисленное дает возможность для исследования термохимических и термоэрозионных характеристик материалов, но только на малоразмерных моделях. Так как создаваемые гетерогенные потоки на газодинамических установках с электродуговыми нагревателями имеют небольшие поперечные сечения.

С помощью газодинамических установок с химическими газогенераторами, созданных у нас с использованием углеводородного [33] и за рубежом – кислородо-водородного жидкого топлива [34], можно исследовать модели любых размеров. В отличие от установок на твердом топливе, данные стенды отличаются возможностью независимого изменения параметров, которые определяют тепловое состояние изучаемых моделей. К таким параметрам относятся температура, давление, химический состав продуктов сгорания, расход и размер частиц. Основным недостатком является сложность данных стендов.

Газогенераторы, используемые для генерации высокотемпературных гетерогенных потоков, с целью моделирования процессов термоэрозионного воздействия на исследуемые объекты, также применяются непосредственно для термоэрозионного разрушения. Примерами данной практики являются: разработка скважин, карьеров, проходка тоннелей в горных породах и т.д. При этом рабочие режимы данных установок лежат в диапазоне характерных параметров для химических газогенераторов, поэтому подробно рассмотрены не будут.

Из проведенного анализа следует, что для моделирования сложных процессов термоэрозионного разрушения материалов для элементов конструкции высокоскоростных ЛА, следует использовать сверхзвуковые высокотемпературные стенды с генерацией гетерогенных потоков.

В МАИ был разработан низкотемпературный газодинамический метод (НТГДМ) создания высокоскоростного гетерогенного потока. Основным отличием НТГДМ от других методов является низкая энтальпия (температура) газа-носителя (до 700К), что способствует слабому нагреву твердых частиц в гетерогенном потоке (менее 10% от температуры плавления материала частиц). Данный факт исключает химические реакции между газом-носителем и твердыми частицами. Также необходимо отметить, что образование гетерогенного потока происходит при высоких скоростях газа-носителя - 500...1500 м/с.

На основе НТГДМ-технологии в МАИ был комплекс уникальных стендов [1], позволяющий проводить исследования в области влияния гетерогенного

потока на различные материалы (рисунок 1.15).

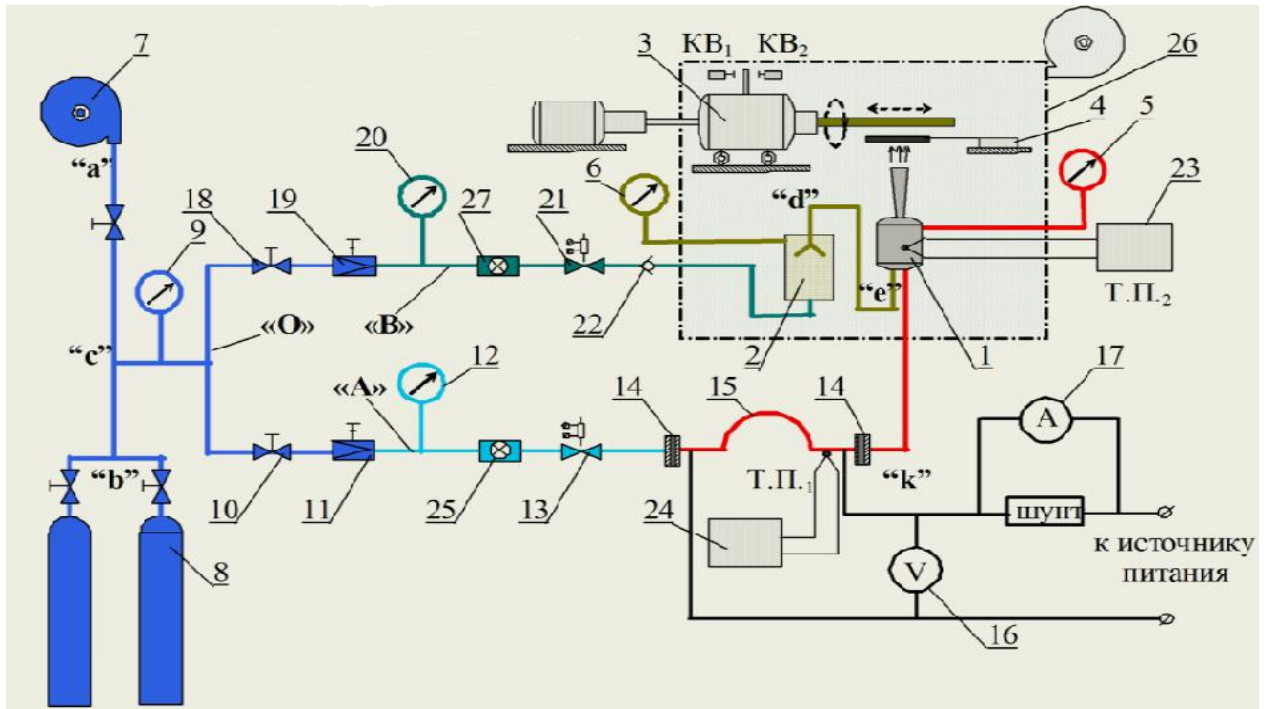


Рисунок 1.15. Принципиальная схема стенда лабораторного типа на основе НТГДМ-технологии

Принципиальная схема установки состоит из следующих агрегатов и узлов [1]:

- камера смешения с сопловым блоком (1) предназначена для смешивания дозы порошка, выданной дозатором (2) и газом-носителем, прошедшим через нагреватель (15). Камера смешения и сопловой блок соединены механически. Это позволяет проводить смену сопловых блоков;

- дозатор частиц эжекторного типа (2) подачи частиц;
- координатное устройство (3) продольного и вращательного типа;
- электромеханическая заслонка (4);
- манометр (5) контроля давления в камере смешения (1);
- манометр (6) контроля давления в устройстве подачи частиц (2);
- компрессор (7);

- баллоны (8) сжатого газа (баллонная раampa), используется в качестве накопителя сжатого газа и ресиверных емкостей. Ресиверные емкости

необходимы для устранения пульсаций давления сжатого газа, возникающих при работе компрессора;

- манометр (9) контроля давления в общей магистрали («О»);
- запорные вентили (10, 18) в магистрали основного расхода газа («А») и магистрали системы подачи частиц («В») – стандартные;
- понижающие редукторы давления (11, 19) в магистрали основного расхода газа («А») и магистрали системы подачи частиц («В»);
- манометры (12, 20) контроля давления в магистрали основного расхода газа («А») и магистрали системы подачи частиц («В»);
- электропневмоклапаны (13, 21) в магистрали основного расхода газа («А») и магистрали системы подачи частиц («В») - стандартные. Представляют собой нормально закрытые клапаны, которые открываются при подаче электрического тока на электромагнитные соленоиды;
- электроизоляционные муфты электрического нагревателя газа-носителя (14) предназначены для электроизоляции омического нагревателя (15) от пневмосистем стенда. Изготавливаются в виде фланцев из нержавеющей стали, разделенных электроизолятором (как правило, керамическим);
- омический нагреватель газа-носителя (15) выполняется в форме спирали (змеевика) из трубки нержавеющей стали;
- вольтметр (16) с пределами измерения, которые должны быть согласованы с регулируемым источником питания омического нагревателя газа-носителя (15) (предположительно пределы измерения вольтметра должны быть 0...300 В) – стандартный;
- амперметр (17) с пределами измерения, которые должны быть согласованы с регулируемым источником питания омического нагревателя газа-носителя (15) (предположительно пределы измерения амперметра должны быть 0...1000 А) – стандартный;
- обратный клапан (22) в магистрали системы подачи частиц («В») - стандартный. Обратный клапан позволяет перетекать газу только в одном направлении (от магистрали «О» к выходу из магистрали «В»). Обычно

исполнительным механизмом обратного клапана является шар, который прижимается пружиной к седлу клапана;

- регистраторы температуры (23, 24) – стандартные;
- измерители массового расхода газа (25) и (27) (при необходимости),
- вентиляционная система (26) должна обеспечивать две функции:

- а) улавливать с помощью фильтров частицы порошка;
- б) обеспечить частичное шумоглушение в процессе работы установки;

Общая магистраль высокого давления («О») начинается от компрессора (7) и баллонов сжатого газа (8), а заканчивается перед редукторами (11 и 19). Магистраль основного расхода газа «А» начинается от редуктора (11) и заканчивается перед камерой смешения с сопловым блоком (1) (точка «е»). Магистраль системы подачи частиц «В» начинается от редуктора (19) и заканчивается перед камерой смешения с сопловым блоком (1) (точка «е»).

### 1.3. Газодинамика гетерогенных потоков

Неотъемлемой чертой гетерогенных потоков является взаимное влияние несущей и дисперсной фаз друг на друга. Большое количество параметров гетерогенных потоков зависят от разницы между скоростями газа-носителя и частиц – скоростного скольжения фаз  $|V - V_p|$ . В силу инерционности дисперсной фазы ее скорость может, как превышать скорость несущей фазы  $V < V_p$ , так и быть меньше  $V > V_p$ . Величина инерционности в свою очередь зависит от размера частиц и от плотности материала частиц: чем больше размер частиц и плотность материала, тем они более инерционны.

Полностью определить состояние гетерогенной смеси в конкретный момент времени можно лишь задав координаты и скорости всех частиц. Данная задача сложна для решения при рассмотрении гетерогенного потока с большой концентрацией частиц, так как любое взаимодействие частиц между собой или с преградой влечет за собой изменение траектории и скорости полета. Для определения параметров данного изменения необходимо знать законы обмена

импульсом и формы частиц. Для решения данной проблемы Рахматуллин Х.А. предложил использовать концепцию взаимопроникающих континуумов [35], которая основывается на следующих допущениях:

- каждый из таких континуумов соответствует определенной фазе (газообразной или конденсированной) и характеризуется в каждой точке пространства средним значением плотности -  $\rho$  или  $\rho_{vp}$ , скорости -  $V$  или  $V_p$  и температуры –  $T$  или  $T_p$ .

- внутри континуума частиц отсутствует их прямой контакт друг с другом, а все их поведение описывается некими осредненными условиями взаимодействия несущей и дискретной фаз. В качестве аргумента в условия взаимодействия входит скоростное и температурное скольжение фаз:  $|V - V_p|$  и  $|T - T_p|$ ;

- функциональный вид условий взаимодействия двух взаимопроникающих континуумов принимается тем же, что и законы сопротивления и теплообмена между бесконечным равномерным потоком и телом, имеющим ту же форму, что и типовая частица.

Данные допущения необходимо принять, поскольку для решения данной задачи в реальной постановке:

- во-первых, необходимо знать коэффициенты сопротивления и теплообмена;
- во-вторых, появляется необходимость учета траектории и столкновения каждой частицы индивидуально.

При натекании гетерогенного потока на преграду вблизи ее поверхности газ-носитель воздействует на частицу несимметрично. Для учета данного явления применяются «законы стенки» или учитывается термофорез внутри теплового пограничного слоя. Данные добавки необходимо учитывать для определенных размеров частиц, и то их вклад незначителен.

Для определения границ применения принятых допущений рассмотрим экспериментальные работы, проведенные американскими исследователями и представителями Сибирского отделения РАН.

Американские ученые провели простой, но в тоже время наглядный эксперимент [36]. Целью эксперимента было оценивание величины взаимного влияния сферических частиц при их свободном падении в емкости с этиленгликолем или водой (рисунок 1.16). На изменении траектории движения частиц, то есть когда траектория частицы отличалась от вертикальной прямой, могли повлиять вихревые следы, которые образовывались за другими, падающими ранее частицами. Частицы подавались через верхнюю крышку емкости, при подаче можно было регулировать расстояние между частицами в диапазоне  $l_p = 1,36 \div 12d_p$ . Также в эксперименте варьировалась скорость падения частиц  $V_p = 0,12 \div 073$  м/с, соответственно, и изменялось число Рейнольдса в диапазоне  $Re_p = 50 \div 1500$ .

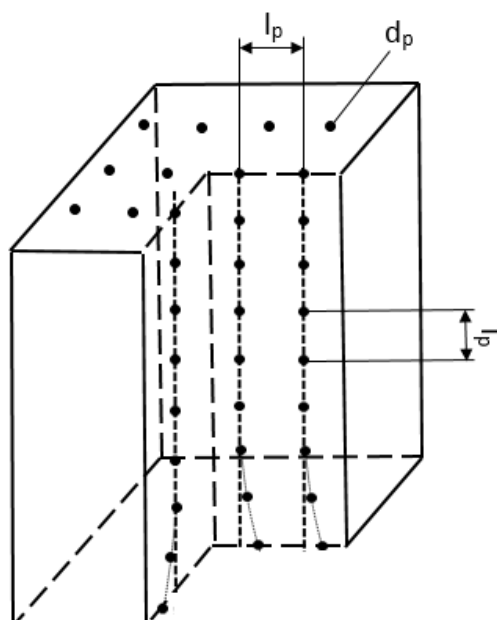


Рисунок 1.16. Схема эксперимента по изучению степени рассеивания частиц

Примеры полученных результатов эксперимента:

- $Re_p = 50$ : влияние не обнаружено во всем диапазоне  $l_p/d_p$ ;
- $Re_p = 380$ : влияние обнаружено при  $l_p/d_p \leq 4$ ;
- $Re_p = 1500$ : незначительное влияние за пределами расстояний между частицами  $l_p/d_p \geq 8$ .

Из проведенного анализа результатов эксперимента можно сделать следующий вывод: влияние частиц друг на друга обнаруживалось только при

высоких числах Рейнольдса  $Re_p$  и небольших расстояниях между частицами  $l_p/d_p$ .

Необходимо отметить, что вихревые следы за сферическими частицами образуются при числах  $Re_p \geq 150$ . Длина данного следа при высоких числах Рейнольдса может достигать величины в 100 калибров:  $L = 100d_p$ . Для влияния на частицу размер вихревого образования должен быть соизмерим с размером частицы, либо с толщиной пограничного слоя, образовавшегося на поверхности частицы.

На рисунке 1.17 приведена диаграмма в координатах  $l_p/d_p - Re_p$ . На ней изображены границы областей с присутствием и отсутствием влияния частиц друг на друга. Необходимо заметить, что число Рейнольдса рассчитано по скоростному скольжению фаз  $|V - V_p|$ , соответственно, данная величина зависит от размера частиц  $d_p$  и плотности материала  $\rho_p$ .

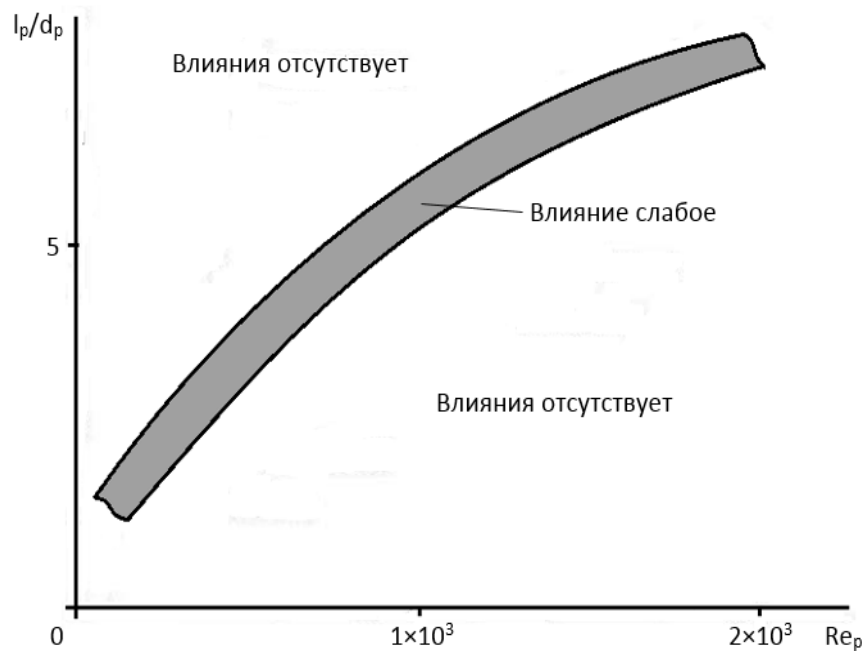


Рисунок 1.17. Области с присутствием и отсутствием влияния частиц друг на друга

Основным выводом из данного эксперимента является то, что влияние частиц друг на друга в гетерогенном потоке короткодействующее и его необходимо учитывать при превышении объемной концентрации частиц



некоторого порогового значения  $\beta_p > \beta_p^*$ , которое, в свою очередь, зависит от относительного расстояния:  $\beta_p \sim (l_p/d_p)^3$ .

В эксперименте, который проводился в сибирском отделении РАН, гетерогенный поток протекал в сверхзвуковом сопле [37]. Использование различных материалов для частиц: бронза, ликопидий и органическое стекло – дало возможность изменять плотность распределения частиц в гетерогенном потоке:  $\rho_{vp} = \beta_p \rho_p$ , где  $\beta_p$  – объемная концентрация,  $\rho_p$  – плотность материала частиц. Форма частиц также, как и у американских исследователей, была сферической.

В данном эксперименте в качестве оцениваемого параметра являлась скорость, которая с помощью лазерно-доплеровской анемометрии измерялась как для газа-носителя, так и для дискретной фазы. Измерение скорости происходило в расширяющейся части сверхзвукового сопла.

На рисунке 1.18 представлены результаты, полученные для частиц из органического стекла.

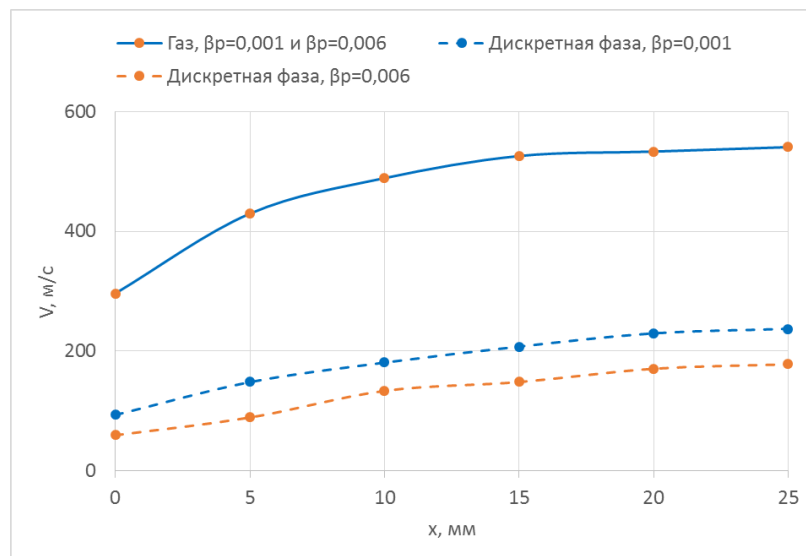


Рисунок 1.18. Влияние объемной концентрации  $\beta_p$  частиц из органического стекла на изменение скорости газа-носителя и дискретной фазы

Из анализа результатов, представленных на рисунке 1.18 видно, что изменение объемной концентрации  $\beta_p$  частиц из органического стекла никак не сказалось на скорости газа-носителя.

На рисунке 1.19 представлены результаты, полученные для частиц из бронзы.

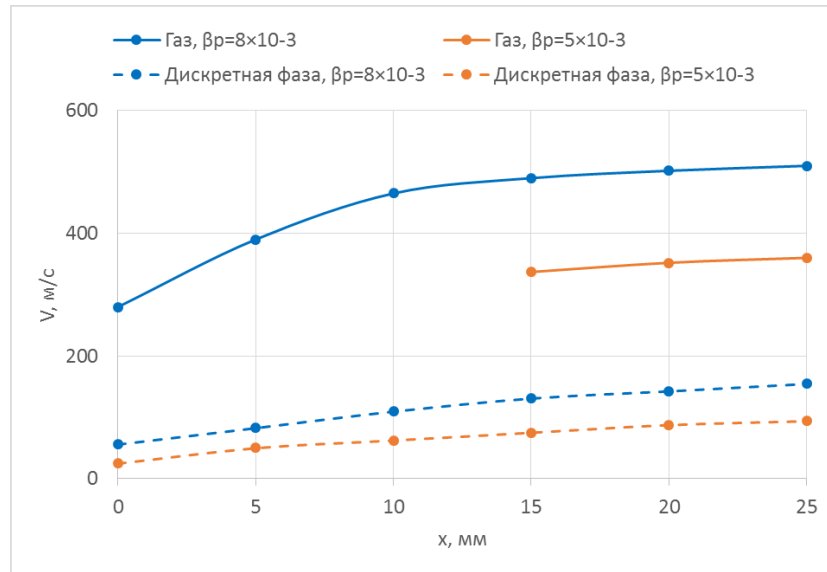


Рисунок 1.19 Влияние объемной концентрации  $\beta_p$  частиц из бронзы на изменение скорости газа-носителя и дискретной фазы

Из анализа результатов, представленных на рисунке 1.19 видно, что изменение объемной концентрации  $\beta_p$  частиц из бронзы повлияло как на скорость газа-носителя, так и на скорость самих частиц: с увеличением объемной концентрации с  $\beta_p = 8 \cdot 10^{-4}$  до  $\beta_p = 5 \cdot 10^{-3}$  скорости газа-носителя и частиц снизились.

Основным выводом из данного эксперимента является величина порогового значения объемной концентрации частиц  $\beta_p^* = 10^{-3}$ . То есть до этого значения отсутствует влияние изменения объемной концентрации частиц на параметры газа-носителя и самих частиц.

Полученные результаты американских исследователей и исследователей из сибирского отделения РАН хорошо согласуются между собой, так как пороговое значение объемной концентрации  $\beta_p^* = 10^{-3}$  соответствует значению относительного расстояния между частицами  $l_p/d_p = 10$ , полученного американскими учеными для больших чисел Рейнольдса. Как говорилось выше, данные величины и отражают границы применимости модели взаимопроникающих континуумов.

Необходимо отметить, что для веществ с меньшей плотностью пороговые значения данных параметров могут быть больше в несколько раз.

#### 1.4. Силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу

Существует три вида сопротивления среды, которые зависят от характера движения тела через среду:

- деформационное, или вязкостное сопротивление – сила деформации среды, необходимая для прохождения в ней тела. Данная деформация может происходить на больших расстояниях от тела впереди и сзади него;
- сопротивление трения на поверхности тела;
- сопротивление давления, обусловленное сжатием среды.

При малых числах Рейнольдса ( $Re \ll 1$ ) преобладает деформационное сопротивление.

Для практических задач, связанных с движением частиц в стационарном потоке, основной силой, действующей на частицу, является сила аэродинамического сопротивления:

$$F_p = 1/2 \cdot C_D \cdot S_p \cdot \rho \cdot |V - V_p| \cdot (V - V_p), \quad (1.1)$$

где  $C_D$  – коэффициент сопротивления,  $S_p$  – площадь миделевого сечения частицы,  $\rho$  – плотность газа-носителя.

Сила аэродинамического сопротивления возникает при обдуве частиц газом-носителем. Данная сила пропорциональна разности абсолютных скоростей газового потока и частиц  $|V - V_p|$ . Дисперсная фаза ускоряется несущим потоком в том случае, когда данная разность больше 0, то есть скорость дисперсной фазы меньше, чем скорость газа.

Влияние остальных сил незначительно.

Также необходимо отметить, что все особенности взаимодействия дисперсной фазы и несущего потока заложены в коэффициенте сопротивления  $C_D$ . Для его определения необходимо решить фундаментальную систему уравнений Навье-Стокса, которая состоит из уравнений сохранения массы,

количества движения, энергии для газа-носителя, обтекающего частицы определенной формы. К сожалению, решение данной системы уравнений получено только для конкретных частных случаев.

Для получения аналитических решений системы уравнений Навье-Стокса принимались следующие допущения:

1. Объемная концентрация частиц в потоке ниже порогового значения, то есть частицы не оказывают влияния друг на друга.

2. Масштаб пространственного изменения поля скоростей газа-носителя много больше размера дисперсной фазы, то есть в каждый данный момент времени частица движется в однородном потоке.

3. Форма частиц сферическая, что дает возможность не рассматривать вращение частицы относительно своего центра масс.

Для диапазона чисел Рейнольдса  $Re_p < 0,5$  коэффициент сопротивления принято рассчитывать по формуле Стокса [2]:

$$C_D = 24/Re_p, \quad (1.2)$$

где  $Re_p$  – число Рейнольдса, рассчитанное по скоростному скольжению фаз ( $V - V_p$ ) и диаметру частиц  $d_p$  -  $Re_p = \rho (V - V_p) d_p / \mu$ , где  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости газа-носителя.

Для значений чисел  $Re_p > 0,5$  применяется какая-либо аппроксимация стандартной кривой сопротивления  $C_D(Re_p)$  для сферических и цилиндрических частиц (рисунок 1.20) [38].

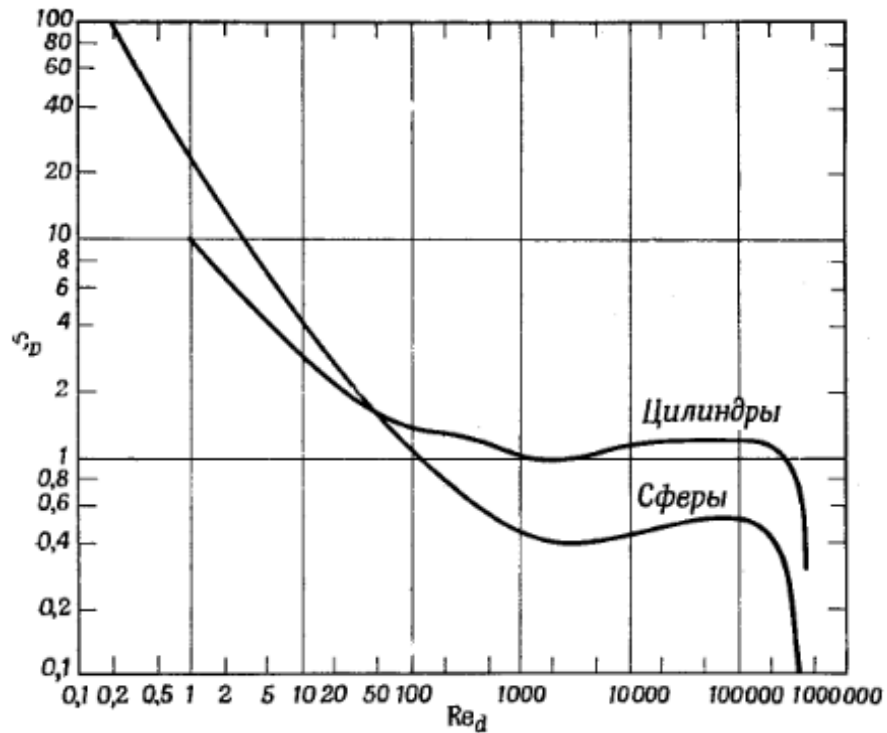


Рисунок 1.20. Стандартная кривая сопротивления для сферических и цилиндрических частиц

Представленная на рисунке 1.20 кривая была получена в результате обобщения большого числа опытных данных, ее погрешность для  $Re_p < 500$  не превышает 3-4 %.

Наиболее удачной аппроксимацией для вычисления коэффициента сопротивления сферической частицы являются зависимости, полученные Хендерсоном [39]:

1. Для числа Маха, рассчитанному по скоростному скольжению фаз, меньше 1 ( $M_p < 1$ ):

$$\begin{aligned}
 C_D(1) = & 24 / \left\{ Re_p + \sqrt{\gamma / 2M_p} \left[ 4,33 + 1,567 \exp \left( -0,247 \frac{Re_p}{\sqrt{\gamma / 2M_p}} \right) \right] \right\} + \\
 & + \left[ \frac{4,5 + 0,38(0,03Re_p + 0,48\sqrt{Re_p})}{1 + 0,03Re_p + 0,48\sqrt{Re_p}} + 0,1M_p^2 + 0,2M_p^3 \right] \exp \left( \frac{-0,5M_p}{\sqrt{Re_p}} \right) + \\
 & + 0,6\sqrt{\gamma / 2M_p} \left[ 1 - \exp \left( \frac{-0,5M_p}{\sqrt{Re_p}} \right) \right], \quad (1.3)
 \end{aligned}$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты.

2. Для числа Маха больше 1,75 ( $M_p > 1,75$ ):

$$C_D(1,75) = 0,9 + \frac{0,34}{M_p^2} + 1,86 \sqrt{\frac{M_p}{\text{Re}_p}} \left( 2 + \frac{8}{\gamma M_p^2} + \frac{2,116}{\sqrt{\gamma/2} M_p} - \frac{4}{\gamma^2 M_p^4} \right) / \left( 1 + 1,86 \sqrt{\frac{M_p}{\text{Re}_p}} \right). \quad (1.4)$$

3. Для промежуточного числа Маха ( $1 \leq M_p \leq 1,75$ ) применяется зависимость, которая вычисляется как интерполяция между значениями  $C_D(1)$  и  $C_D(1,75)$ :

$$C_D = C_D(1) + \frac{4}{3} (M_p - 1) [C_D(1,75) - C_D(1)]. \quad (1.5)$$

### Выводы по главе 1

1. Проведен анализ использования гетерогенных потоков в транспортном и энергетическом машиностроении с целью сопоставления энергетических режимов и основных параметров применяемых гетерогенных потоков.

2. Проведен сравнительный анализ применяемых методов и средств моделирования процессов взаимодействия гетерогенных потоков с твердой стенкой.

3. Рассмотрена газодинамика гетерогенных потоков, отмечена необходимость применения допущений в виде модели взаимопроникающих континуумов и отражены границы ее применимости.

4. Описаны основные силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу. Отмечены особенности взаимодействия дисперсной фазы и несущего потока, которые заложены в коэффициенте сопротивления  $C_D$ . Проанализированы зависимости для вычисления коэффициенте сопротивления  $C_D$  для частиц сферической формы.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ С ПРЕГРАДОЙ**

При исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой на различных экспериментальных установках необходимо наличие измерительной системы для диагностики основных параметров гетерогенного потока и исследуемых моделей объекта.

Методов и средств измерений параметров великое множество. В данной работе остановимся на наиболее эффективных методиках для диагностики параметров, характерных при решении рассматриваемой задачи.

### **2.1. Лазерная доплеровская анемометрия**

В настоящее время лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) являются одним из самых эффективных, а зачастую и единственным средством для локальной диагностики гетерогенных потоков.

Лазерная доплеровская анемометрия является бесконтактным методом измерения. К основным преимуществам бесконтактных методов относится возможность диагностики без внесения возмущающих воздействий в исследуемую среду. К преимуществам непосредственно лазерной доплеровской анемометрии можно отнести:

- высокое пространственное разрешение из-за малой величины измерительного объема;
- возможность измерения мгновенных значений скоростей, причем всех трех компонент вектора скорости, как совместно, так и отдельно;
- линейная зависимость между частотой доплеровского сигнала и скоростью;
- высокая устойчивость и повторяемость полученных результатов.

При любых исследованиях для использования лазерных доплеровских анемометров должны выполняться следующие условия:

- исследуемая среда должна содержать светорассеивающие частицы и иметь небольшую оптическую плотность;
- экспериментальная установка должна иметь определенные места доступа для лазерных лучей или для ввода оптического зонда.

Принцип лазерной доплеровской анемометрии заключается в зависимости частоты излучения света, отражённого или рассеянного частицами, движущимися в потоке, от скорости их движения (эффект Доплера) [40, 41, 42, 43].

Пусть на частицу, движущуюся со скоростью  $V_p$ , падает монохроматическое излучение с частотой  $\omega_0$  и волновым вектором  $k_0$  (рисунок 2.1). Тогда отражённое (рассеянное) излучение от поверхности частицы в пространство, согласно эффекту Доплера, будет иметь волновой вектор  $k_p$  и частоту  $\omega_p$ , которая отличается от частоты падающего излучения.

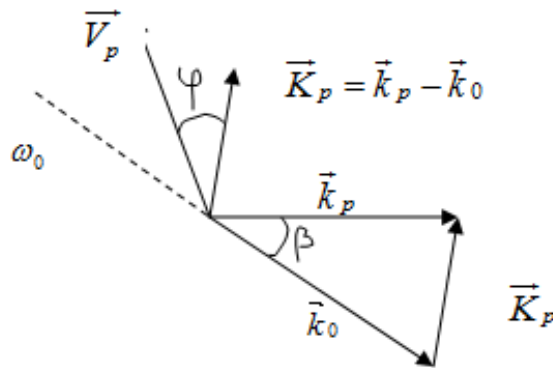


Рисунок 2.1. Взаимное расположение векторов рассеяния

Доплеровский сдвиг частоты можно найти из выражения:

$$\omega_p - \omega_0 = V_p \left( k_p - k_0 \right). \quad (2.1)$$

Данное выражение определяет проекцию вектора скорости частицы  $V_p$  на разностный вектор  $k = k_p - k_0$ , который, в свою очередь, зависит от длины волны падающего излучения  $\lambda_0$  и угла  $\beta$  между векторами  $k_p$  и  $k_0$ .



Скорость частицы выражается через доплеровскую частоту и вычисляется по формуле:

$$V_p \cdot \cos \varphi = f_D \cdot \frac{\lambda}{2 \sin \beta}, \quad (2.2)$$

где  $f_D = \frac{\omega_0}{2\pi}$ ,  $\varphi$  - угол между направлениями волны и движения частицы.

Характерной особенностью эффекта Доплера является линейная зависимость доплеровского сдвига частоты от величины скорости частицы. В свою очередь, коэффициент пропорциональности зависит от геометрических параметров схемы, а именно углов  $\beta$  и  $\varphi$ , и оптических свойств среды.

Для исследования гетерогенных потоков чаще всего используют дифференциальную схему лазерной доплеровской анемометрии. Принцип данной схемы заключается в том, что на частицу в гетерогенном потоке падают два лазерных пучка с волновыми векторами  $k_1$  и  $k_2$  и близкими частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (рисунок 2.2).

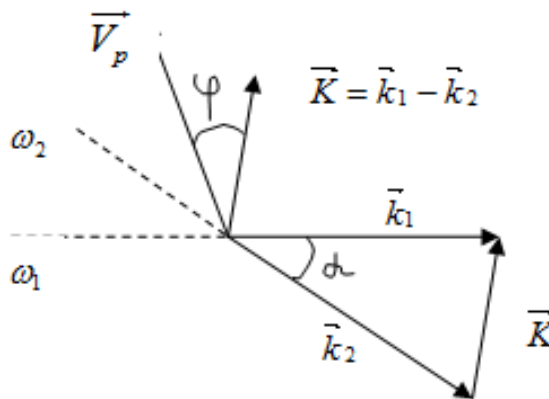


Рисунок 2.2. Взаимное расположение векторов рассеяния при дифференциальной схеме лазерной доплеровской анемометрии

Разностная частота между отраженными сигналами двух лазерных можно найти из выражения:

$$\omega_D = \omega_1 - \omega_2 = V_p \cdot (k_1 - k_2). \quad (2.3)$$

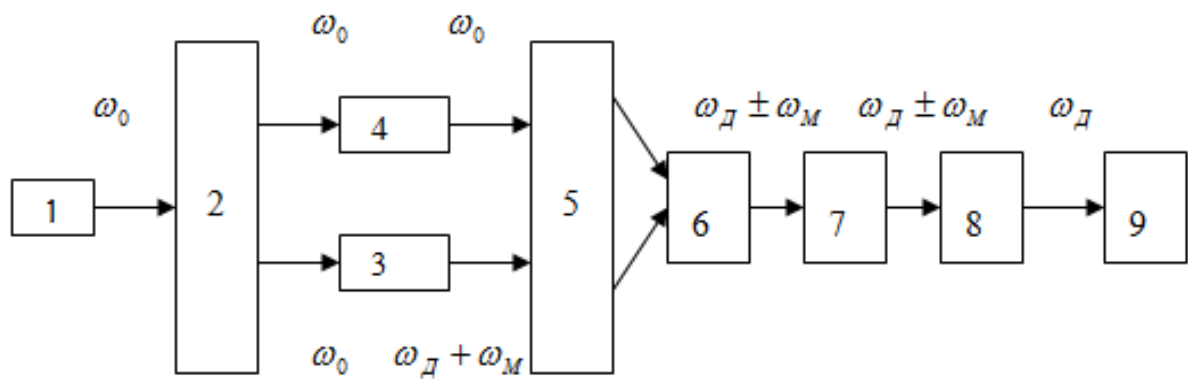
Скорость частицы можно вычислить, используя выражение (2.4):

$$f_D = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{2V_p}{\lambda_0 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (2.4)$$

где  $\alpha$  - угол между двумя зондирующими лазерными пучками.

Необходимо отметить, что при дифференциальной схеме лазерной доплеровской анемометрии, разностная частота между отраженными сигналами  $\omega_D$  (2.3) не зависит от направления наблюдения рассеянного излучения.

Общая схема лазерного доплеровского анемометра, работающего по дифференциальной схеме, представлена на рисунке 2.3.



- 1 – лазер, 2 – блок формирования зондирующих пучков (расщепитель),  
 3 – однополосный модулятор, 4 – линия задержки, 5 – блок передающей оптики,  
 6 – исследуемый объект (гетерогенный поток), 7 – блок приемной оптики,  
 8 – фотоприемник, 9 – устройство обработки сигнала

Рисунок 2.3. Блок-схема ЛДА, работающего по дифференциальной схеме

Лазер – 1 является источником излучения ЛДА. В расщепителе – 2 исходное излучение лазера делится на два пучка. Для сдвига частоты излучения  $\omega_0$  на величину частоты модуляции –  $\omega_m$  один из пучков проходит через однополосный модулятор – 3. Для выравнивания длины оптического пути другой пучок пропускается через линию задержки. Далее через блок передающей оптики – 5 пучки лазера направляются на исследуемый гетерогенный поток – 6. Рассеянное частицами гетерогенного потока лазерное излучение собирается приёмной оптикой – 7 и направляется в фотоприемник – 8 для суммирования рассеянного излучения

от обоих пучков. Результирующий сигнал, в котором и передается величина скорости частиц, с фотоприемника направляется в блок устройства обработки сигнала – 9.

Одним из основных параметров гетерогенных потоков, который необходимо регистрировать на экспериментальных установках, является скоростное скольжение фаз  $/V - V_p/$ . Величина погрешности ее измерения в результате диагностики скорости газа-носителя и скорости частиц независимо друг от друга может не удовлетворять необходимым параметрам достоверности исследования. Для регистрации скоростного скольжения фаз методами лазерной доплеровской анемометрии в гетерогенный поток, содержащий частицы определенного размера, необходимого для исследования, добавляются частицы такого размера, скорость которых будет максимально приближена к скорости газа-носителя. Естественно, чем меньше частица, тем ее скорость скольжения относительно газа-носителя будет меньше. Соответственно, методами лазерной доплеровской анемометрии замеряются две скорости: скорости обычных частиц, размеры которых соответствуют необходимым параметрам исследования, и скорости мелких частиц. Таким образом, при вычислении скорости скольжения фаз  $/V - V_p/$ , за скорость газа-носителя принимается скорость мелких частиц.

## **2.2. Определение плотности конвективного теплового потока**

Для исследования баланса энергии частиц при взаимодействии гетерогенного потока с исследуемым объектом необходимо точными и надежными методами определять плотность конвективного теплового потока.

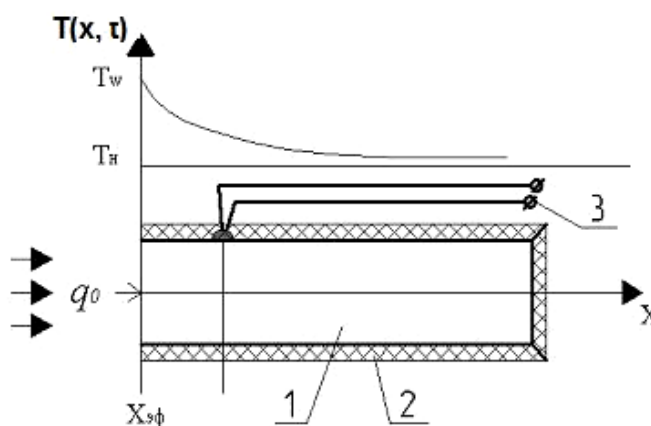
Применяемый метод решения калориметрических задач определяется исследуемым процессом и условиями проведения данного исследования. В основном данные приборы основываются на реализации в процессе теплообмена между набегающим потоком и исследуемым объектом регулярного режима 1-го рода [44].

Так как существует большое количество разнообразных приборов и калориметрических методов, рассмотрим наиболее надежные и часто применяемые калориметры для исследования взаимодействия гетерогенного потока с преградой – это калориметры "стержневого" и "таблеточного" типов. Они являются неохлаждаемыми калориметрами.

### 2.2.1. Калориметр «стержневого» типа

Калориметр «стержневого» типа (рисунок 2.4) состоит из:

1. Цилиндрического стержня бесконечной длины, который является теплоприемным элементом.
2. Теплоизоляции, которой покрываются все поверхности калориметрического датчика кроме одной торцевой поверхности.
3. Термопары, зачеканенной в калориметрический датчик для измерения изменения температуры теплоприемного элемента во времени.



- 1- цилиндрический стержень бесконечной длины (теплоприемный элемент),  
2- теплоизоляция, 3- термопара

Рисунок 2.4. Схема калориметра «стержневого» типа

Так как калориметры стержневого типа основываются на реализации регулярного режима 1-го рода (коэффициент теплоотдачи и температура

набегающего потока постоянны), то плотность теплового потока в торцевую поверхность датчика можно вычислять, применяя закон Фурье:

$$q_0 = -\lambda \cdot \text{grad}T. \quad (2.5)$$

Процесс теплообмена между набегающим потоком и калориметрическим датчиком «стержневого типа» осуществляется только через одну торцевую поверхность, которая не теплоизолирована.

Теплоприемным элементом данного типа датчика является «бесконечный стержень», то есть тело классической формы, соответственно, решение задачи нестационарной теплопроводности упрощается до рассмотрения одномерного случая [44], поэтому:

$$\text{grad}T = \frac{dT(x, \tau)}{dx}, \quad (2.6)$$

где  $dT(x, \tau)$  – функция распределения температуры по длине теплоприемного элемента во времени.

Решение основного дифференциального уравнения теплопроводности в одномерной постановке (2.7) позволит определить функцию распределения температуры по длине теплоприемного элемента во времени.

$$\frac{dT(x, \tau)}{d\tau} = a \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.7)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности материала теплоприемного элемента, который определяется по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c_p}. \quad (2.8)$$

Для решения основного дифференциального уравнения теплопроводности в одномерной постановке (2.7) задаются следующие условия однозначности:

1. Начальные условия:

$$T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0. \quad (2.9)$$

2. Граничные условия:

$$T(x, \tau)|_{\tau=\tau_1} = T_w. \quad (2.10)$$

В результате решения поставленной задачи методом операционного исчисления [45], получаем:

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau_{\text{эксн}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right). \quad (2.11)$$

Выразив из выражения (2.11) плотность теплового потока, получаем:

$$q_0 = \frac{\lambda [T(x, \tau) - T]}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right)}, \quad (2.12)$$

где  $\tau_{\text{эксн}}$  – время протекания эксперимента, то есть время взаимодействия торцевой поверхности калориметра «стержневого типа» с набегающим гетерогенным потоком;  $\text{ierfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right)$  – функция, получаемая в результате интегрирования функции ошибок Гаусса и определяемая выражением:

$$\text{ierfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left( -\frac{x^2}{4a\tau_{\text{эксн}}} \right) - \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}}, \quad (2.13)$$

где  $x$  – расстояние по длине теплоприемного элемента от торцевой части, взаимодействующей с набегающим потоком, до точки зачеканивания термопары.

Графический вид функции (2.13) представлен на рисунке 2.5 [46].

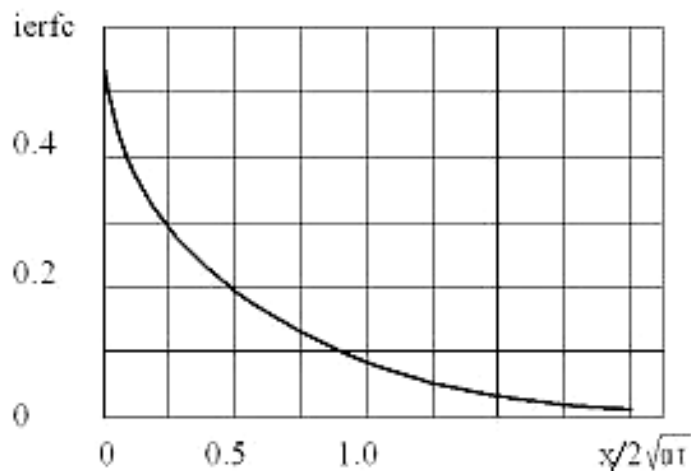


Рисунок 2.5. Графический вид функции  $\text{ierfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right)$

Выражение (2.12) позволяет определить конвективный тепловой поток от набегающего гетерогенного потока в калориметрический датчик «стержневого типа».

На рисунке 2.6 представлена фотография калориметра «стержневого» типа.

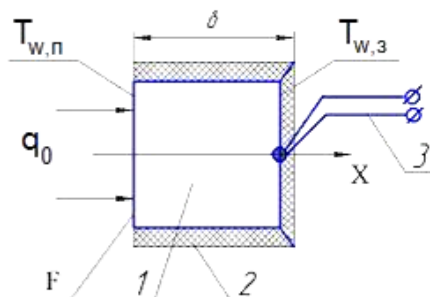


Рисунок 2.6. Калориметр «стержневого» типа

### 2.2.2. Калориметр «таблеточного» типа

Калориметр «таблеточного» типа (рисунок 2.7) состоит из:

1. Теплоприемного элемента в виде таблетки толщиной  $\delta$ ;
2. Теплоизоляции, которой покрываются все поверхности калориметрического датчика кроме одной торцевой поверхности площадью  $F$ ;
3. Термопары, зачеканенной в калориметрический датчик для измерения изменения температуры теплоприемного элемента во времени.



*1 - теплоприемный элемент, 2 - теплоизоляция, 3 - термопара,  $q_0$  - плотность теплового потока,  $T_{w,n}$  и  $T_{w,z}$  - температура передней и задней поверхностей, соответственно,  $F$  - площадь торцевой поверхности, воспринимающей теплоту*

Рисунок 2.7. Схема калориметра «таблеточного» типа

Основной принцип работы калориметрического датчика «таблеточного» типа заключается в том, что все подведенная набегающим гетерогенным потоком теплота к теплоприемному элементу с известными характеристиками (массой, геометрическими параметрами) расходуется на изменение его энтальпии [45]. Данный принцип можно представить с помощью следующего выражения:

$$Q = \Delta I = \bar{c} \cdot m \frac{d\bar{T}(x, \tau)}{d\tau} \Delta\tau, \quad (2.14)$$

где  $m$  - масса теплоприемного элемента,  $\bar{c}$  - удельная теплоемкость материала теплоприемного элемента при среднемассовой температуре  $\bar{T}$ ,  $\Delta\tau$  - время протекания эксперимента, то есть время взаимодействия торцевой поверхности калориметра с набегающим гетерогенным потоком.

Если в качестве геометрической формы теплоприемного элемента выбрать «таблетку» с площадью торцевой поверхности  $F$ , толщиной  $\delta$  и плотностью материала  $\rho$ , то масса данного теплоприемного элемента определяется из выражения:

$$m = F \delta \rho. \quad (2.15)$$

Тогда выражение (2.14) для калориметра «таблеточного» типа принимает вид:

$$q = \frac{Q}{F \cdot \Delta\tau} = \rho c \delta \frac{(\bar{T}_{таб,2} - \bar{T}_{таб,1})}{\Delta\tau}, \quad (2.16)$$

где  $(\bar{T}_{таб,2} - \bar{T}_{таб,1})$  – изменение температуры теплоприемного элемента в интервале времени проведения эксперимента  $\Delta\tau$ , то есть  $\bar{T}_{таб,2}$  – среднемассовая температура теплоприемного элемента в момент времени  $\tau_2$ ,  $\bar{T}_{таб,1}$  – среднемассовая температура теплоприемного элемента в момент времени  $\tau_1$ .

В свою очередь, среднемассовые температуры определяются выражением:

$$\bar{T}_i(\tau) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T_i(x, \tau) dx. \quad (2.17)$$

На рисунке 2.8 представлена фотография калориметра «таблеточного» типа.





Рисунок 2.8. Калориметр «таблеточного типа»

Величина относительной суммарной квадратичной погрешности определения тепловых потоков рассчитывается по формуле [1]:

$$\frac{\Delta q}{q_0} = \pm \left[ \Delta \left( \frac{d\bar{T}_k}{d\tau} \right)^2 + \Delta \left( \frac{\Delta \bar{T}_{\tau,k}}{T_{\tau,k}} \right)^2 + \Delta \left( \frac{\Delta q_{0,пот.}}{q_0} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.18)$$

где  $q_0$  определяемая плотность теплового потока в приемный элемент калориметра,

$\Delta \left( \frac{\Delta q_{0,пот.}}{q_0} \right)$  – неучтенные потери тепла в калориметре,  $\Delta \left( \frac{\Delta \bar{T}_{\tau,k}}{T_{\tau,k}} \right)$  – погрешность,

обусловленная термической (температурной) инерцией термопары

теплоприемного элемента калориметра,  $\Delta \left( \frac{d\bar{T}_k}{d\tau} \right)$  – погрешность обработки

результатов измерений.

### 2.3. Определение температуры поверхности исследуемого объекта

При исследовании взаимодействия гетерогенного потока с преградой определение температуры поверхности преграды является важной задачей. Данный параметр можно измерять как контактными методами, так и бесконтактными.

К контактными методам диагностики температуры поверхности исследуемого объекта относятся измерения с помощью термопар. К основным преимуществам применения термопар относятся [47, 48, 49]:

- простота применения;
- высокая точность;
- достаточная чувствительность к изменению температуры.

В таблице 2.1 представлены наиболее популярные виды термопар и их основные характеристики [50].

Таблица 2.1. Термопары и их характеристики

Тип термопары	Термо-ЭДС, $mV$ при $t = 100\text{ }^{\circ}C$	Верхний предел измерения, $^{\circ}C$		Максимально допустимая термо ЭДС, $mV$
		длительно	кратковременно	
Медь-копель	4,75	200...350	500	-
Медь-константан	4,1	350	400	27,4
Хромель-копель	6,35	600	800	49,11...66
Хромель-алюмель	4,1	1100	1300	45,16
Платина-платинородий	0,64...0,08	1480	1600	15...16
Платинородий-платинородий	0,456	1600	1800	11...13
Вольфрам - вольфрамрений	1,34	1800	2200	26,8...27,37

Основным недостатком термопар является наличие верхнего предела измеряемой температуры. Соответственно, при температурах набегающего потока превышающих данную величину используют бесконтактные, а точнее оптические методы измерения температуры поверхности преграды [48, 51].

Оптические методы измерения температуры поверхности исследуемого объекта основаны на применении закона Планка [52].

Для определения истинной температуры  $T_w$  необходимо знать величину яркостной температуры  $T_{w,\lambda}$ :

$$T_w^{-1} = T_{w,\lambda}^{-1} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon_{\lambda}, \quad (2.19)$$

где  $\varepsilon_\lambda$  – монохроматическая степень черноты,  $c_2$  – постоянная излучения,  $\lambda$  – длина волны.

А согласно закону Планка для определения яркостной температуры  $T_{w,\lambda}$  исследуемого объекта необходимо знать его энергетическую яркость излучения  $B_\lambda$  на определенной длине волны  $\lambda$ :

$$B_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot B_{0,\lambda} = \varepsilon_\lambda \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{w,\lambda}}\right), \quad (2.20)$$

где  $B_\lambda$  и  $B_{0,\lambda}$  – монохроматические яркости излучения исследуемого объекта и абсолютно черного тела, соответственно;  $c_1$  – постоянная излучения.

Формула (2.20) также имеет ограничения по применению, она справедлива при:  $\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{w,\lambda}} \gg 1$ , то есть при максимальной температуре поверхности исследуемого объекта  $T_w < 3000$  К и длине волны  $\lambda < 1$  мкм.

Основной проблемой данного типа оптических методов является определение истинной температуры измерения  $T_w$ . Наиболее популярный способ диагностики истинной температуры с помощью сверления глубокой выемки в исследуемых объектах не возможен в применении для исследования задач взаимодействия гетерогенного потока с преградой, так как для данного типа задач свойственны большие градиенты температур в поверхностных слоях исследуемых объектов. Поэтому для определения истинной температуры поверхности преграды при взаимодействии с гетерогенным потоком применяют методы, которые используют сторонний источник света [53]. К таким методам относятся:

1. Метод обращения для самоизлучающей поверхности;
2. Рефлекторный метод.

Оценка среднеквадратичной погрешности измерения температуры поверхности осуществляется с помощью выражения [1]:

$$\bar{\sigma}(\Delta T_w) = \pm \left( \Delta T_{гр}^2 + \Delta T_\lambda^2 + \Delta T_\varepsilon^2 + \Delta T_A^2 \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

где  $\Delta T_{гр}$  – погрешность градуировки системы измерения,  $\Delta T_{\lambda}$  – погрешность определения длины волны монохроматора (пирометра),  $\Delta T_{\varepsilon}$  – погрешность определения степени черноты поверхности, –  $\Delta T_{\lambda}$  погрешность пирометрического ослабления яркости излучения нейтральным фильтром.

## **Выводы по главе 2**

1. Проведен критический анализ методов и средств диагностики основных параметров при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой.

2. Проведен критический анализ лазерной доплеровской анемометрии, как основного метода для измерения локальных скоростей, как газа-носителя, так и частиц.

3. Проведен критический анализ калориметрических методов измерения конвективного теплового потока от гетерогенной среды в исследуемый объект. Рассмотрены калориметры «стержневого» и «таблеточного» типа.

4. Проведен критический анализ методов и средств диагностики температуры поверхности исследуемого объекта. Рассмотрены контактные и бесконтактные методы.

### **3. ОБТЕКАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ, ПРИТУПЛЕННОГО СФЕРОЙ, ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИМ ГЕТЕРОГЕННЫМ ПОТОКОМ**

Исследование проблемы обтекания тел произвольной формы с набегающим потоком актуально во многих областях науки и техники. Однако даже при упрощённой постановке (набегающий поток – идеальный газ), задачи подобного плана не имеют аналитического решения для тел произвольной формы.

Если же анализируется задача обтекания тела потоком вязкой жидкости, решение задачи значительно усложняется. Это объясняется тем, что в уравнениях математической модели появляются, так называемые, «вязкие члены», которые вносят значительные изменения в характеристики набегающего потока, например, в законы распределения давления и скорости и др. [54]

Задача ещё более усложняется, если обтекание тела реализуется высокоскоростным полидисперсным гетерогенным потоком. Как отмечалось, с задачами подобного рода приходится сталкиваться при полёте высокоскоростных изделий авиационной и ракетной техники в аномальных зонах атмосферы с естественными (дождевыми) и искусственными (пылевыми) образованиями [55].

В данной главе сделана попытка с использованием математического моделирования решения численным методом задачи обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.

#### **3.1. Математическая модель обтекания летательного аппарата конической формы, притупленного сферой, высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком**

Гетерогенные потоки встречаются как в природе, так и в практической деятельности. С точки зрения теоретических знаний, на сегодняшний день

накоплен значительный опыт для математического моделирования течения гетерогенных потоков. Тем не менее, задача обтекания тел разных форм высокоскоростными гетерогенными потоками все ещё остается актуальной при эксплуатации в экстремальных условиях изделий авиационной, ракетной и космической техники. Задача также требует своего решения в ряде других отраслей промышленности.

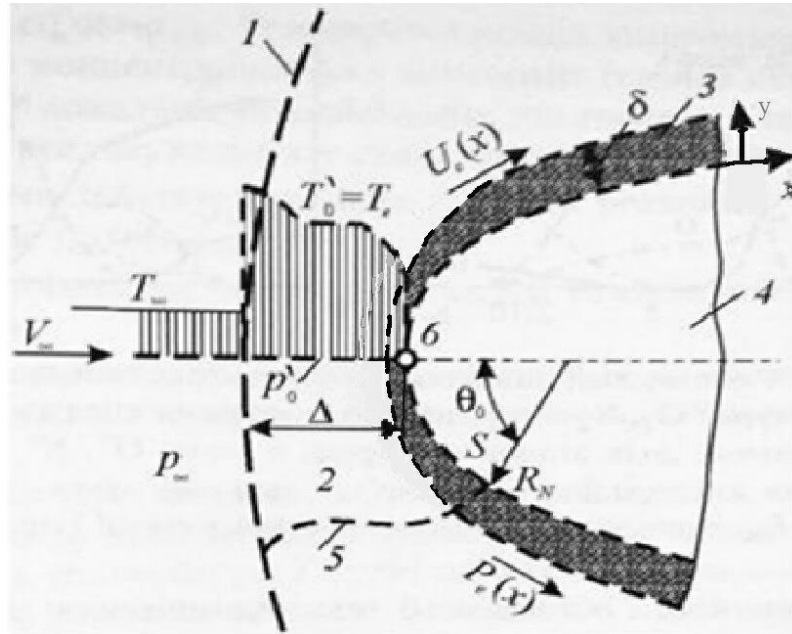
### 3.1.1. Постановка задачи

Решению подлежала задача обтекания летательного аппарата сверхзвуковым гетерогенным потоком. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 3.1. [17, 18]

Таблица 3.1. Исходные данные

Параметр.	Характеристика.
Форма летательного аппарата	Конус, притупленный сферой
Геометрические размеры летательного аппарата	– радиус сферического притупления: $R_N=0,5$ м – длина конической части по образующей: $L_{кон.}=2$ м – угол конусности: $\gamma =30^\circ$
Угол атаки при полёте	$\alpha = 0^\circ$
Материал частиц «К-фазы»	$SiO_2$
Дисперсность твердой фазы	от 1 до 30 мкм
Массовая концентрация твердой фазы в гетерогенном потоке	до 10 %
Высота полета	$H=20$ км
Скорость полета (число Маха)	$M_\infty \leq 6$

Разработанная математическая модель задачи в такой постановке [56], построена на описании комплекса процессов, происходящих за ударной волной – в сжатом и пограничном слое, а также на поверхности летательного аппарата (рисунок 3.1).



1 – ударная волна, 2 – зона невязкого течения за ударной волной, 3 – пограничный слой, 4 – затупленное тело, 5 – линия перехода через скорость звука ( $M=1$ ), 6 – передняя критическая (ПКТ),  $\Delta$  – толщина сжатого слоя,  $\delta$  – толщина пограничного слоя,  $T_0' = T_0$  – изменение температуры в сжатом слое по нормали в ПКТ,  $\theta$  – угловая координата,  $T_\infty$  и  $V_\infty$  – температура и скорость невозмущенного потока,  $U_e(x)$  – распределение скорости потока на внешней границе пограничного слоя,  $P_e(x)$  – распределение давления на внешней границе пограничного слоя

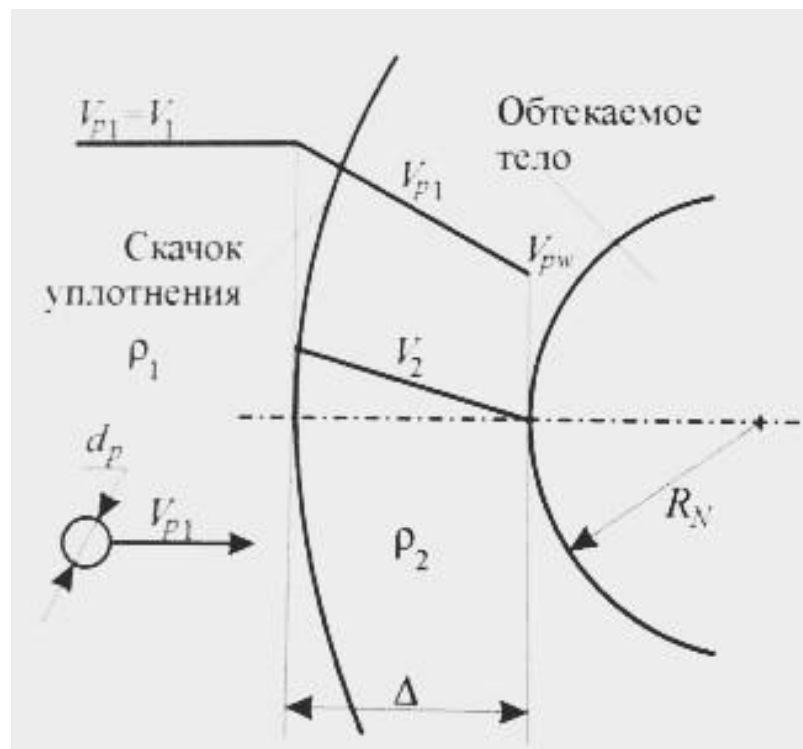
Рисунок 3.1. Схема обтекания притупленного сферой конуса сверхзвуковым потоком

Обтекание затупленных тел сверхзвуковыми потоками характеризуется следующим набором газодинамических и физико-химических процессов [57]:

- во-первых, при сверхзвуковых скоростях обтекания перед затупленным телом образуется отошедшая ударная волна, которая отходит от поверхности обтекаемого тела и остается эквидистантной от неё в окрестности передней критической точки;
- во-вторых, необходимо отметить автомодельность давления вдоль поверхности тела при больших значениях  $M_\infty$ ;
- в-третьих, за отошедшей ударной волной происходит рост температуры, который обусловлен торможением набегающего потока, то есть

происходит переход кинетической энергии потока в тепловую.

Так как течение между ударной волной и поверхностью обтекаемого тела дозвуковое, то при обтекании тела высокоскоростным гетерогенным потоком, скорость частиц также будет снижаться вслед за изменением скорости газ-носителя (рисунок 3.2). Но по мере движения гетерогенного потока вдоль поверхности тела происходит разгон до первоначальных значений числа Маха невозмущенного потока. При этом мы имеем дело с высокотемпературным гетерогенным потоком.



$V_{p\infty}$  – скорость «К – фазы» в невозмущенном потоке,  $V_\infty$  и  $\rho_1$  – скорость и плотность газовой фазы в невозмущенном потоке,  $V_{p2}$  – скорость «К – фазы» за ударной волной,  $V_2$  и  $\rho_2$  – скорость и плотность газовой фазы за ударной волной

Рисунок 3.2. Схема торможения газовой фазы и «К – фазы» в сжатом слое

### 3.1.2. Математическая модель течения газовой фазы

Газовая динамика – это раздел механики сплошных сред, описывающий движение жидкостей и газов в рамках модели сплошной среды.



Сплошность среды означает, что масштаб рассматриваемых явлений, значительно больше длины свободного пробега молекул, а также позволяет нам применять все физические законы и свойства как к макрообъектам, так и к бесконечно малым объёмам.

Как известно, произвольные движения сплошной среды описываются уравнениями Навье-Стокса. Следует отметить, что в связи с невозможностью точного разрешения общей системы уравнений Навье-Стокса, перед исследователями стоит проблема отыскания инструмента приближенного решения задач газовой динамики, но при самой общей постановке. Как правило, в качестве подобного инструмента используются разработанные численные методы решения, в которых применён достаточно гибкий и прозрачный математический аппарат. Но для данного типа задач возникает проблема получения сходящегося и устойчивого численного решения.

В отдельных случаях при решении задач подобного рода используется метод приближенных вычислений с заранее оговоренными свойствами и границами применимости.

В настоящее время разработка эффективных численных методов стало самостоятельным научным направлением, одним из основных достижений которого являются специализированные вычислительные пакеты. Данные пакеты программ создаются для решения конкретного класса задач и на сегодняшний день являются наиболее эффективным и доступным инструментом.

В данной работе для построения математической модели учитывались «возможности» и функционал CFD (computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика) комплекса ANSYS CFX. Он относится к наиболее популярным и широко используемым специализированным вычислительным пакетам, предназначенных для решения задач газодинамики. Данный программный пакет интегрирован в расчетную среду ANSYS Workbench, что позволяет решить поставленную задачу полностью, не прибегая к помощи других инструментов. Также к преимуществам данного пакета относится наличие информации о практике его применения.

В общем случае для решения многопараметрической задачи газовой динамики создаётся математическая модель течения, которая решается численными методами. Такая модель включает систему из четырех независимых уравнений в виде [17]:

1. Систему уравнений Навье-Стокса в векторной форме:

- уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \Delta \cdot (\rho \vec{V}) = 0. \quad (3.1)$$

- уравнения количества движения (сохранения импульса)

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla \rho + \nabla \cdot \vec{\tau} + S_M, \quad (3.2)$$

где  $\vec{\tau}$  - тензор напряжений:

$$\vec{\tau} = \mu \left[ \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \partial \nabla \cdot \vec{V} \right]. \quad (3.3)$$

В свою очередь,  $\delta$  - дельта-функция Кронекера

$$\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

2. Уравнение энергии (сохранения энергии):

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial \tau} - \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_0) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{V} \vec{\tau}) + \vec{V} S_E + S_M, \quad (3.5)$$

где  $h_0$  - энтальпия торможения газовой фазы:

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2}, \quad (3.6)$$

$h$  - статическая (термодинамическая) энтальпия:

$$h = C_p(p, T) dT. \quad (3.7)$$

3. Уравнение состояния для каждого  $i$ -го компонента газовой фазы

$$p_i = \frac{\rho_i}{M_i} R_i T. \quad (3.8)$$

В соотношениях (3.1)÷(3.8) использованы следующие обозначения:  $p$  - статическое давление газовой фазы,  $\rho$  - плотность газовой фазы,  $V$  - скорость газовой фазы,  $T$  - статическая температура газовой фазы,  $\tau$  - время,  $S_M$  - источниковый член для импульса,  $S_E$  - источниковый член для энергии,  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости газовой фазы,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности газовой фазы,  $\nabla$  - оператор Гамильтона (набла), знак  $(\rightarrow)$  - обозначает векторную величину.

Анализ представленных дифференциальных уравнений (3.1)÷(3.8) показывает, что основные переменные (плотность  $\rho$ , давление  $p$  и температура  $T$ ) подчиняются обобщенному закону сохранения [58, 59, 60].

Пусть зависимая переменная, которая представляет основные переменные  $(\rho, p, T)$ , обозначается -  $\phi$ .

В таком случае, обобщенное дифференциальное уравнение будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial\tau} + \nabla(\rho\vec{V}\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S, \quad (3.9)$$

где  $\Gamma$  - коэффициент диффузии;  $S$  - источниковый член.

Данное обобщенное дифференциальное уравнение состоит из четырех членов: нестационарного, конвективного, диффузионного и источникового. При записи данного уравнения для одной из основных переменных коэффициенту диффузии  $\Gamma$  и источниковому члену  $S$  придаётся смысл, соответствующий данной переменной.

Система уравнений (3.1)÷(3.8) представляют общую математическую модель поведения жидкости (газа), которая детально и строго описывает практически весь спектр режимов её течений. Однако на практике при реализации высокоскоростных течений, например, гиперзвуковых, математическая модель усложняется. В этом случае представленная выше система дополняется рядом

уравнений (совокупность эмпирических, алгебраических или дифференциальных уравнений), которые представляют модели турбулентности, отрывные течения, неравновесную химическую кинетику, неизотермические полидисперсные гетерогенные течения и др.

Наиболее востребованным численным методом решения математических моделей газовой динамики является метод контрольного объема, который реализован в CFD комплексе ANSYS CFX.

### ***3.1.3. Математическая модель течения «К-фазы»***

На сегодняшний день, при математическом моделировании обтекании тел гетерогенными потоками используют в основном два метода [61]:

- метода Эйлера (метод Эйлер-Эйлер), описывающий как течение несущей газовой, так и дисперсной фаз. В методе гетерогенная система в целом рассматривается как сплошная среда, к которой применяется модель взаимопроникающих континуумов. Основным недостатком метода является сложность адекватного описания процесса отражения частиц от поверхности обтекаемого тела, а также взаимодействие отраженных от поверхности тела частиц с частицами набегающего гетерогенного потока [62];

- метод Эйлер-Лагранж: течение несущей фазы описывается методом Эйлера, а динамика дисперсной фазы методом Лагранжа. Данный подход с достаточной точностью описывает столкновения как между частицами, так и частиц с поверхностью [63].

В настоящей работе для решения задачи использован метод Эйлер-Лагранж. В результате для «К-фазы» по методу Лагранжа рассчитывались траектории и характеристики индивидуальных частиц разной дисперсности в определенные промежутки времени [17]. Например, ускорение частицы гетерогенного потока вычислялось с использованием уравнения переноса количества движения в виде [64]:

$$m_p \frac{dU_p}{d\tau} = F_D, \quad (3.10)$$

где  $m_p$  – масса частицы,  $U_p$  – скорость частицы,  $F_D$  – сила аэродинамического сопротивления межфазного взаимодействия, возникающая из-за разности скоростей газовой и твердой фаз. В свою очередь,  $F_D$  представляется формулой:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_p |\bar{U}_F - \bar{U}_p| (\bar{U}_F - \bar{U}_p), \quad (3.11)$$

где  $C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы,  $\rho_F$  – плотность газовой фазы,  $A_p$  – площадь миделевого сечения частицы,  $U_F$  – скорость газовой фазы.

В случае химически неактивных сжатого и пограничного слоя конвективный теплообмен между газом-носителем и частицей твердой фазы рассчитывается с использованием соотношения [56, 65]:

$$Q_{кон,p} = \pi \cdot d_p \cdot \lambda_{газ} \cdot Nu_{w,d} (T_{газ} - T_p), \quad (3.12)$$

где  $\lambda_{w,газ}$  – коэффициент теплопроводности газа при температуре поверхности частицы,  $T_{газ}$  – температура газа-носителя,  $T_{w,p}$  – температура поверхности частицы,  $Nu_{w,d}$  – число Нуссельта. Индексы «w» и «p» означают, что для критерия  $Nu_{w,d}$  определяющей температурой является температура частицы  $T_{w,p}$ , а характерным размером – диаметр частицы.

Из теории конвективного теплообмена известно, что при обтекании сферы ламинарным потоком газа, число Нуссельта можно определить из критериального алгебраического соотношения вида [56, 65]:

$$Nu_{w,d} = 2 + 0.6 Re_{w,d}^{0.5} \cdot Pr_w^{1/3} \quad (3.13)$$

где  $Pr_w = \frac{\mu_{газ} \cdot Cp_{газ}}{\lambda_{газ}}$ . В свою очередь,  $Cp_{газ}$  – удельная теплоёмкость газовой фазы при температуре стенки;  $\lambda_{газ}$  – коэффициент теплопроводности газовой фазы при

температуре стенки;  $\mu_{\text{газ}}$  – коэффициент динамической вязкости газовой фазы при температуре стенки.

Далее, зная  $Q_{\text{кон},p}$ , просто определить конечную температуру частицы, достигнувшей поверхности конструкции. С этой целью используется соотношение:

$$Q_{\text{кон},p} = c_p \cdot m_p \cdot (T_{p,\text{кон}} - T_{\text{нач}}) \quad (3.14)$$

### **3.2. Особенности численного решения математической модели процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой**

Система уравнений (3.1÷3.8) и обобщенное уравнение сохранения (3.9) представляет математическую модель течения газовой фазы. Она состоит в основном из дифференциальных уравнений в частных производных первого и второго порядка, в которых, в свою очередь, присутствует нелинейная зависимость членов уравнений от переменных.

Так как на практике точное аналитическое решение данной системы можно получить только для простых тел: пластины, сферы, цилиндра и клина – то для решения задачи газовой динамики в общей постановке применяются численные методы.

#### **3.2.1. Структура численного решения основных дифференциальных уравнений газовой динамики**

Схема последовательности проведения операций при численном решении математической модели представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3. Последовательность операций при численном решении математической модели

Для решения поставленной задачи исходную систему дифференциальных уравнений в частных производных, которая полностью описывает исследуемый нами процесс, а также условия однозначности (начальные и граничные условия) необходимо преобразовать в систему дискретных алгебраических уравнений. Данное преобразование называется дискретизацией. Выбор метода дискретизации зависит от стационарности процесса, то есть, содержат ли исходные дифференциальные уравнения производные по времени.

При исследовании нестационарного процесса дискретизация производных по времени осуществляется в основном с помощью разностных методов [59, 60]. Для дискретизации пространственных производных применяют метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод конечных объемов [66, 67].

Полученные в результате дискретизации алгебраические уравнения связывают между собой значения искомым переменных в узлах сетки, которая

охватывает всю расчётную область и распределена в ней как во времени, так и в пространстве [58].

На этапе дискретизации происходит разложение исходной функции в ряды. Данные ряды упрощаются путём отбрасывания членов высшего порядка малости и заменой дифференциалов переменных их приращениями. В результате данного преобразования возникает ошибка аппроксимации.

Известно, что для согласованности исходных дифференциальных уравнений в частных производных и системы алгебраических уравнений, полученных в результате дискретизации, в каждом узле сетки, необходимо, чтобы размеры ячеек сетки и величина шага по времени стремились к нулю. Соответственно, величина ошибки аппроксимации характеризует свойство согласованности численного метода дискретизации [66, 67].

Решение алгебраических уравнений, аппроксимирующих заданное дифференциальное уравнение в частных производных, называют сходящимся, если это решение приближается к точному решению дифференциального уравнения для любого значения независимой переменной, по мере того как размеры ячеек сетки и шаг по времени приближаются к нулю. В этом случае может быть установлена ошибка решения, которая определяется как разница между точными решениями дифференциальных уравнений и решением алгебраических уравнений и характеризует свойство сходимости [66, 67].

На сегодняшний день наиболее популярным методом дискретизации при решении задач газовой динамики является метод контрольного объема. Данный метод реализован в CFD комплексе ANSYS CFX.

### ***3.2.2. Метод контрольного объёма***

Метод конечных объёмов (МКО) или метод контрольного объёма в англоязычной литературе называется Finite Volumes Method (FVM).



Основа метода выражается в следующем: расчётная область с помощью сетки разбивается на совокупность непересекающихся контрольных объёмов, для которых должны выполняться законы сохранения массы, количества движения и энергии. Дифференциальные уравнения интегрируют по каждому контрольному объёму с использованием функции формы. Данная функция характеризует изменение искомой переменной  $\phi$  между расчётными узловыми точками сетки. В результате определяется дискретный аналог исходного дифференциального уравнения. Расчётным узлом в МКО является центр контрольного объёма.

Полученный подобным образом дискретный аналог выражает закон сохранения искомой переменной  $\phi$  для конечного контрольного объёма точно так же, как дифференциальное уравнение выражает закон сохранения для бесконечно малого контрольного объёма [58].

Детальное представление МКО проведём на примере преобразований уравнений неразрывности, количества движения и обобщенного дифференциального уравнение в координатной форме. Имеем:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho V_i) = 0, \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho V_i V_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) \right], \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho V_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \Gamma \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \right] + S. \quad (3.17)$$

Далее, необходимо проинтегрировать каждое из представленных выражений по контрольному объёму  $\Omega$ . Для этого воспользуемся теоремой Остроградского-Гаусса и выполним преобразование объёмных интегралов в поверхностные, где это необходимо. Также следует отметить, что при отсутствии деформации контрольного объёма расчётная сетка не меняется с течением времени и соответствующие производные могут быть вынесены за знак интеграла:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho V_i dn_i = 0, \quad (3.18)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho V_j d\Omega + \int_S \rho V_i V_j dn_i = - \int_S P dn_i + \int_S \mu \left( \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) dn_i + \int_{\Omega} S V_j d\Omega, \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_S \rho V_i \phi dn_i = \int_S \Gamma \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) dn_i + \int_{\Omega} S d\Omega, \quad (3.20)$$

где  $\Omega$  - контрольный объём;  $S$  - контрольная поверхность, ограничивающая контрольный объём;  $dn_i$  - дифференциал декартовой составляющей вектора внешней нормали к поверхности.

В приведенных выражениях количественный уровень переменных в контрольном объёме определяется объёмными интегралами, а потоки переменных через границы контрольного объёма – поверхностными интегралами.

Далее с помощью схем дискретизации различного порядка точности, преобразуем точные интегральные уравнения (3.18 – 3.20) в дискретную форму.

Объёмные составляющие преобразуем путём аппроксимации переменных внутри отдельных сегментов ячейки (рисунок 3.4) и их последующего интегрирования по каждому из объёмных сегментов, представляющих в сумме контрольный объём. Поверхностные составляющие (потоки) сначала вычисляются для точек интегрирования, расположенных в центре сегмента поверхности, в которую заключен контрольный объём, а затем полное изменение вычисляется интегрированием полученных потоков через отдельные грани [59, 60].

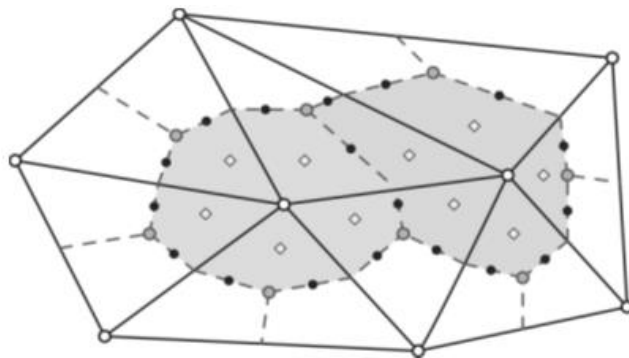


Рисунок 3.4. Формирование контрольных объёмов на основе сеточной модели

Используя далее схему аппроксимации Эйлера с разностью назад первого порядка, дискретная форма интегральных соотношений преобразуется к виду:

$$\Omega \left( \frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho V_i \Delta n_i)_{ip} = 0, \quad (3.21)$$

$$\Omega \left( \frac{\rho V_j - \rho^0 V_j^i}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (V_j)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_j)_{ip} + \sum_{ip} \left( \mu \left( \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) \Delta n_i \right) + \overline{S}_{V_j} \Omega, \quad (3.22)$$

$$\Omega \left( \frac{\rho \phi - \rho^0 \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \phi_{ip} = \sum_{ip} \left( \Gamma \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \Delta n_i \right) + \overline{S} \Omega, \quad (3.23)$$

где  $\Delta t$  - шаг по времени;  $\Delta n_i$  - приращение декартовой составляющей вектора внешней нормали к поверхности; индекс « $ip$ » означает вычисление для точки интегрирования и суммирование по всем точкам интегрирования данного контрольного объёма; индекс «0» указывает, что величина соответствует предыдущему значению времени.

Запишем далее выражение для массового расхода газа  $\dot{m}_{ip}$  через поверхность контрольного объёма в виде:

$$\dot{m}_{ip} = (\rho V_i \Delta n_i)_{ip}. \quad (3.24)$$

Величины искоемых переменных, определённые в результате решения, приводятся к центрам соответствующих контрольных объёмов. Для определения значений некоторых членов уравнений в точках интегрирования используются функции формы.

Характер изменения искомой переменной  $\phi$  внутри контрольного объёма определяется зависимостью:

$$\phi = \sum_{i=1}^n N_i \phi_i, \quad (3.25)$$

где  $N_i$ - аппроксимирующая функция для  $i$ -го узла;  $\phi_i$  - значение переменной в  $i$ -м узле;  $n$  - число узлов элемента.

Суммирование проведём по всем узлам контрольного объёма, используя при этом следующие свойства аппроксимирующей функции:

$$\text{- для } i\text{-го узла: } \sum_{i=1}^n N_i = 1; \quad (3.25)$$

$$\text{- для } j\text{-го узла: } N_i = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (3.26)$$

Одним из основных преимуществ МКО перед другими методами дискретизации является выполнение законы сохранения массы, количества движения и энергии в любом контрольном объёме, в любой группе контрольных объёмов, и, следовательно, во всей расчётной области. На данное свойство не оказывает влияние размер сетки.

### **3.3. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой**

Программный комплекс ANSYS CFX ориентирован на решение численными методами любых задач газовой динамики. Одним из преимуществ данного комплекса является его интеграция в расчётную среду ANSYS Workbench, что позволяет решать задачи, используя только данный инструмент.

В CFD комплекс ANSYS CFX состоит из следующих модулей:

- препроцессор CFX-Pre;
- решатель CFX-Solver;
- постпроцессор CFX-Post.

#### ***3.3.1. Построение расчётной модели***

На начальном этапе численного моделирования необходимо разработать расчётную модель, которая включает следующие элементы:

- геометрическая модель;
- сеточная модель;
- параметры, определяющие свойства домена: модель газа, модель турбулентности и граничные условия.

Все перечисленные элементы расчётной модели взаимосвязаны. Структура построения расчётной модели представлена на рисунке 3.5.

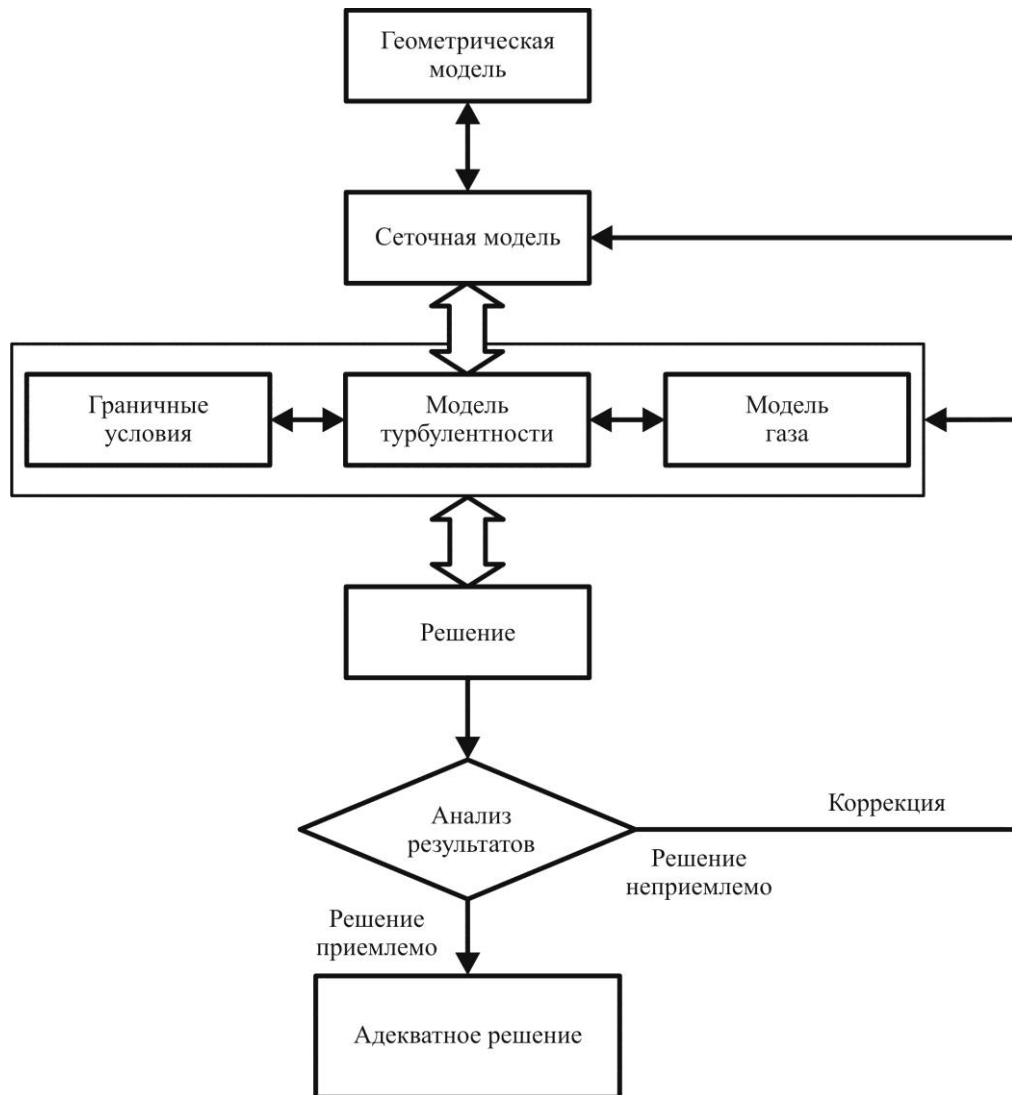


Рисунок 3.5. Структура построения расчётной модели

Основой всей расчётной модели является геометрическая модель. В настоящее время разработано множество инструментов в виде систем автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют проектировать геометрические модели любой сложности.

Геометрическая модель (рисунок 3.6) для поставленной задачи представляет из себя расчётную область с вырезанным из неё летательным аппаратом. Форма ЛА – конус, притупленный сферой. Геометрические параметры ЛА: диаметр сферы притупления,  $d_{сферы} = 0.5 \text{ м}$ ; длина конической части по образующей,  $l_{кон.} = 2 \text{ м}$ ; угол конусности,  $\alpha = 30^\circ$  [18, 68].



Рисунок 3.6. Геометрическая модель

На основе геометрической модели проектируется сеточная модель. Данный этап выполнялся в программном пакете ANSYS ICEM CFD, который имеет блочную структуру. Разделение на блоки произведено по функциональному назначению. ANSYS ICEM CFD состоит из следующих блоков (модулей) [65]:

- геометрический модуль. Предназначен для построения несложных геометрических моделей, а также для необходимой корректировки импортированных геометрических моделей;

- модуль Shell Meshing. Предназначен для создания сеточной модели на основе поверхностной сетки с применением прямоугольных или треугольных элементов;

- модуль TETRA. Предназначен для создания сеточной модели на основе тетраэдрических объемных сеток (рисунок 3.7);

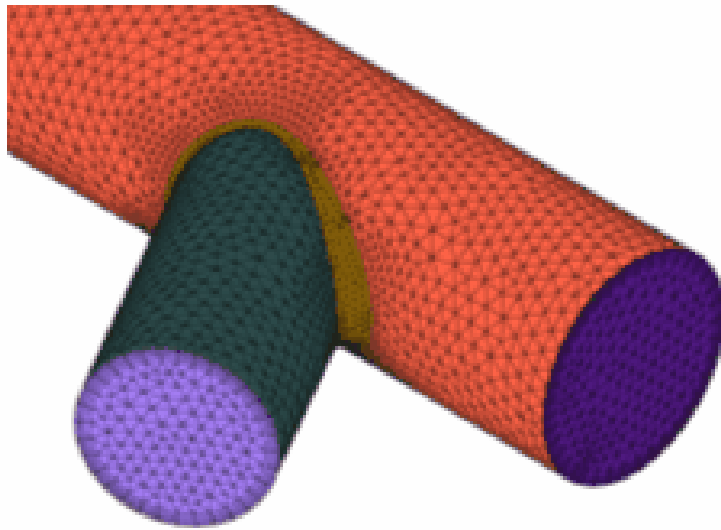


Рисунок 3.7. Пример сеточной модели на основе тетраэдрической сетки

- модуль PRISM. Предназначен для корректировки тетраэдрической сетки с применением призматического подслоя. Такой приём применяется для более точного описания пристеночных течений;

- модуль HEXA. Предназначен для создания сеточной модели на основе структурированных многоблочных или неструктурированных гексагональных сеток (рисунок 3.8);

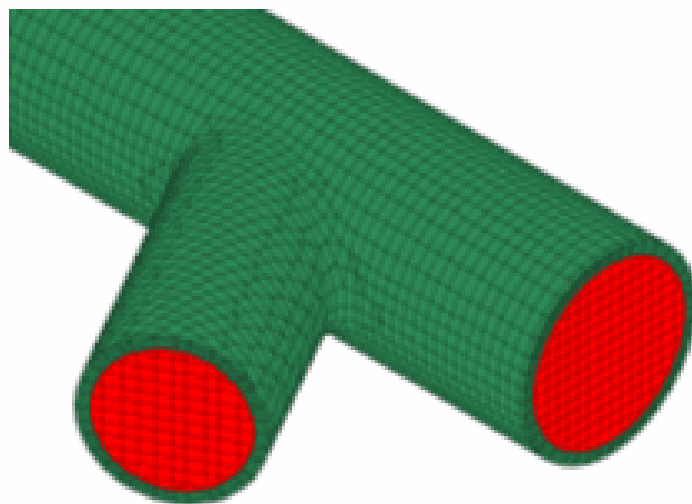


Рисунок 3.8. Пример сеточной модели на основе гексаэдрической сетки

- модуль Hybrid Meshes. Предназначен для создания гибридной сетки при объединении разных типов сеток;

- препроцессор. Предназначен для задания необходимых граничных условий. Данный этап является завершающим при создании расчётной модели для численного моделирования. Далее расчётная модель передается непосредственно в решатель;

- постпроцессор. Предназначен для обработки, визуализации и анализа полученных данных в результате численного моделирования;

Кроме указанного, программный пакет ANSYS ICEM CFD обладает инструментами для оценки и анализа качества сетки, конвертирования элементов сетки из одного типа в другой.

При решении поставленной в работе задачи на базе геометрической модели (рисунок 3.6) в программном пакете ANSYS ICEM CFD была разработана сеточная модель на основе структурированной гексаэдрической сетки (рисунок 3.9) [18].

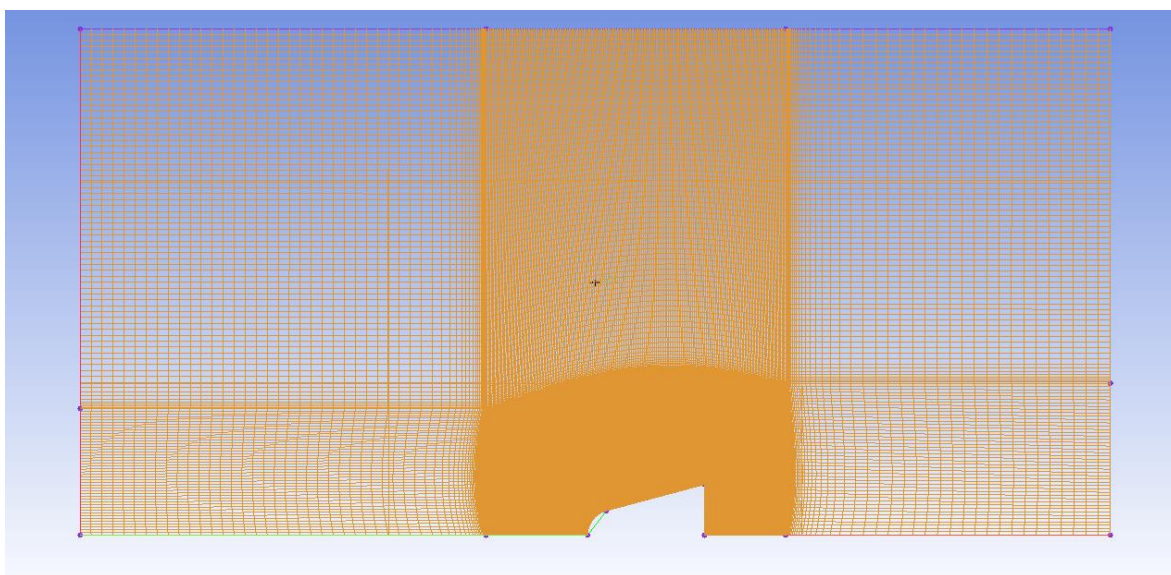


Рисунок 3.9. Разработанная для расчёта сеточная модель

К основным преимуществам использования структурированных сеток можно отнести малое время счёта по сравнению с неструктурированными. Кроме того, использование структурированных сеток позволяет быстро изменять параметры сеточной модели, а также проводить детальный контроль ячеек при



создании сетки. Это, в свою очередь, даёт возможность для более тщательной проработки зон геометрической модели, обладающих характерными особенностями (например: зона скачка уплотнения, отрывная зона и др.).

Для лучшего разрешения пристеночного пограничного слоя на поверхности ЛА было применено сгущение сетки (рисунок 3.10).

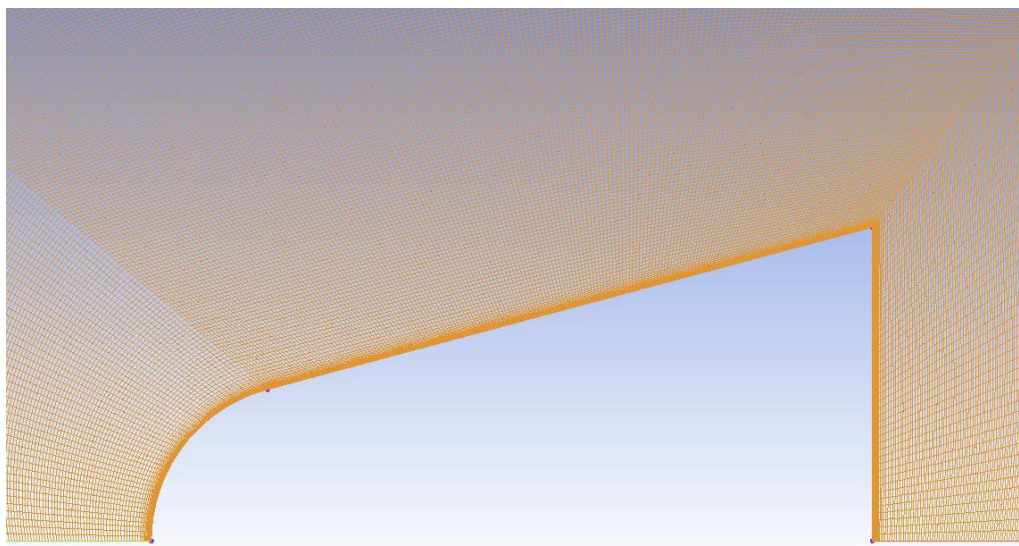


Рисунок 3.10. Структурированная гексаэдрическая сетка со сгущением ячеек по поверхности ЛА

На следующем этапе создания расчётной модели задаются условия однозначности, то есть параметры, определяющие свойства домена: модель газа, модель турбулентности и граничные условия [18].

Модель газа:

- род газа – воздух;
- начальные условия:  $T_{нач}=216,66\text{ К}$ ,  $P_{нач}=5526\text{ Па}$ ;  $V_{нач}=50\text{ м/с}$ .

В качестве граничных условий (рисунок 3.11) на «входе» расчётной области задавались значения скорости  $V=1800\text{ м/с}$  ( $M \approx 6$ ), температуры  $T=216,66\text{ К}$  и давления  $P=5526\text{ Па}$ . Массовая концентрация частиц в потоке, задавалась 10-ю % от массовой концентрации газовой фазы. Также определялся закон распределения диаметров частиц по площади входного сечения.

На остальных границах расчётной области задавались следующие условия:

- на поверхности - условие типа «стенка»;

- учитывалась симметрия тела;

- сверхзвуковой выход и свободный выход при параметрах атмосферы на высоте полёта ЛА:  $H = 20 \text{ км}$ ;  $T = 216.66 \text{ К}$ ,  $P = 5526 \text{ Па}$ .

Необходимо отметить, что значение скорости набегающего потока на границе «вход» повышалось постепенно до требуемой величины –  $M = 6$ .

Материал «К-фазы» -  $\text{SiO}_2$  (двуокись кремния).

По форме все частицы в каждом вычислительном эксперименте считались однородными шарами диаметрами от 1 до 30 мкм. Взаимодействие твердой фазы с поверхностью ЛА считалось абсолютно упругим.

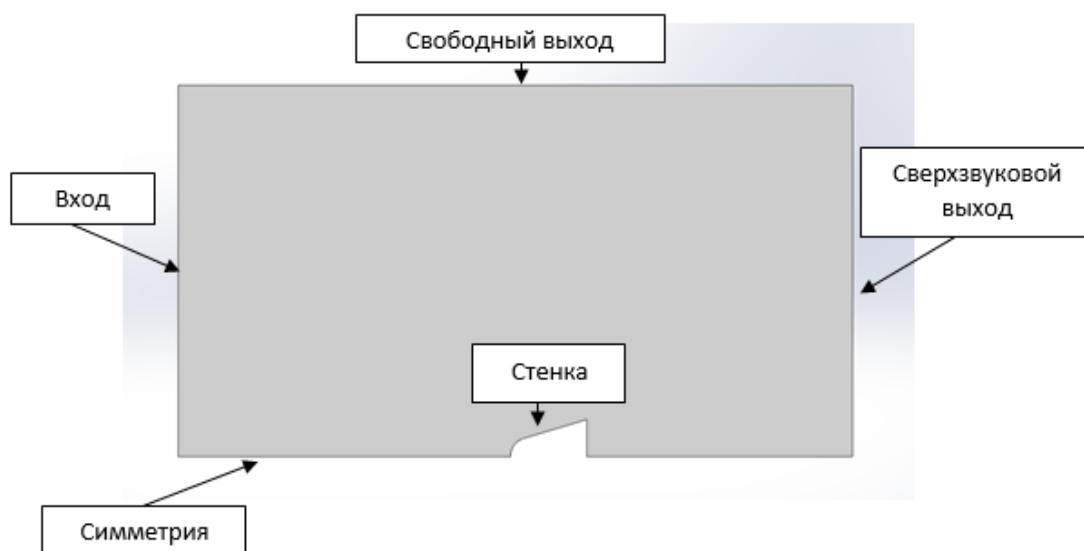


Рисунок 3.11. Граничные условия

Одним из важных аспектов при численном моделировании задач газовой динамики является выбор модели турбулентности. Данная проблема возникает по причине отсутствия универсальной модели турбулентности, то есть каждая модель турбулентности имеет границы применимости. Необходимо отметить, что от выбора модели турбулентности зависят параметры сеточной модели такие как: минимальный размер ячейки на поверхности обтекаемого тела, соотношение сторон ячеек сеточной модели и так далее. При решении поставленной задачи применялась модель турбулентности SST.

### 3.3.1. Проведение математического моделирования и анализ результатов

В работе первый этап математического моделирования выразался в проведении расчётов математической модели, описывающей процесс обтекания высокоскоростным гомогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. Параметры набегающего потока представлены в постановке задачи.

Результаты численного моделирования приведены на рисунках 3.12 ÷ 3.14 [18]. Они позволяют судить об адекватности построенной расчётной модели, о соответствии заданных условий однозначности параметрам поставленной задачи, а также о параметрах набегающего гомогенного потока вблизи поверхности ЛА.

Из представленных результатов видно, что Число Маха изменяется по поверхности сферы от 0 (в передней критической точке - ПКТ) до 1 (звуковая линия –  $\alpha=45^\circ$ ). Параметры торможения в ПКТ: давление торможения –  $P^*=2,645 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , температура торможения –  $T^*=1781 \text{ К}$ .

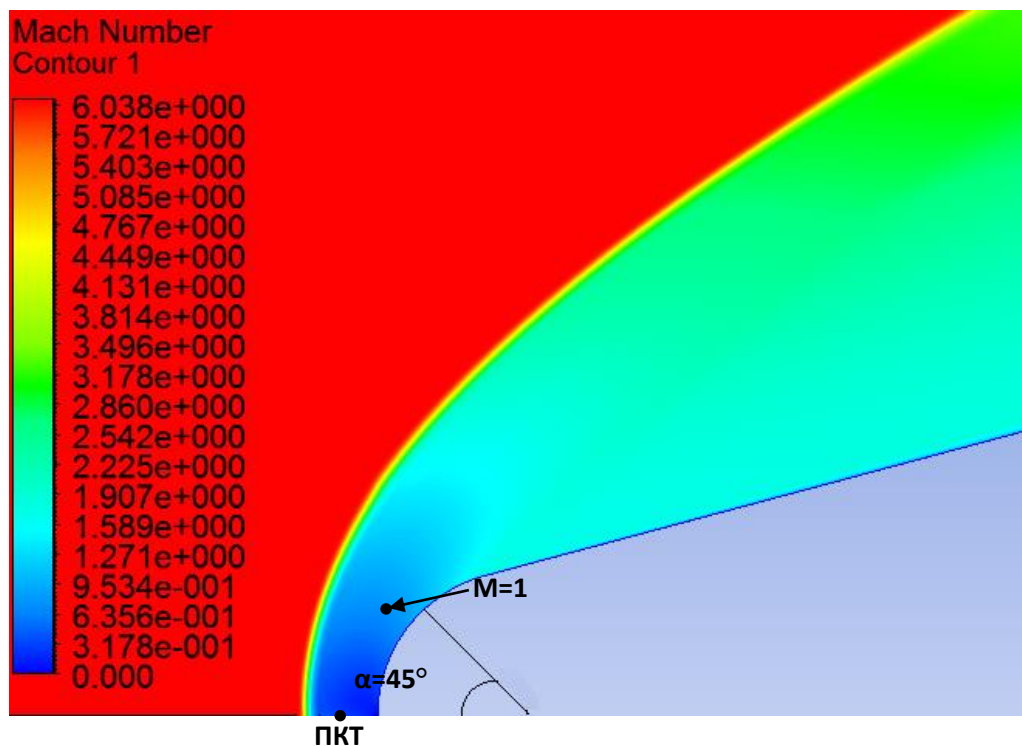


Рисунок 3.12. Визуализация результатов численного моделирования – распределения числа Маха в расчётной области

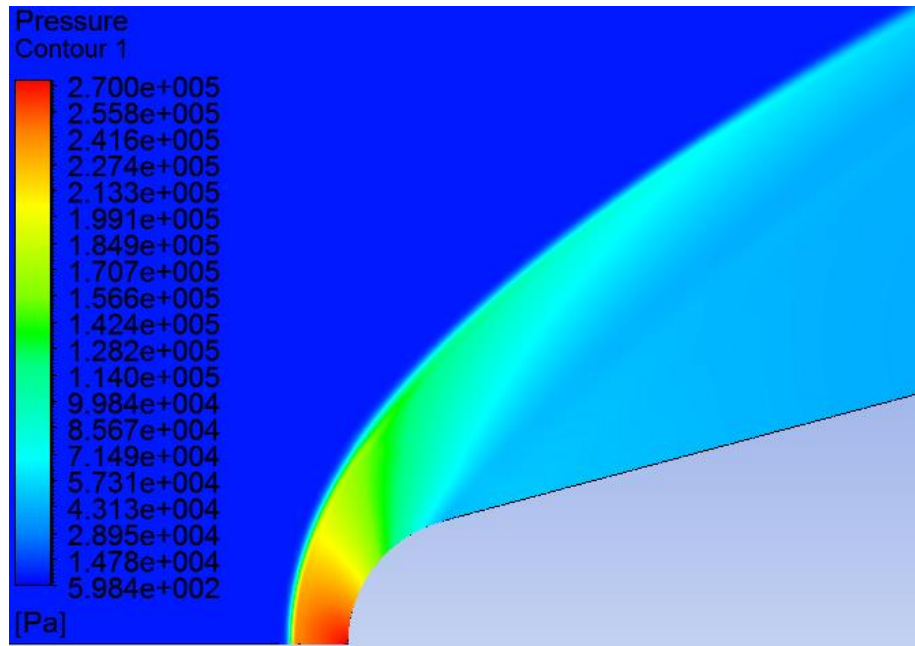


Рисунок 3.13. Визуализация распределения результатов численного моделирования – распределения поля давления в расчётной области

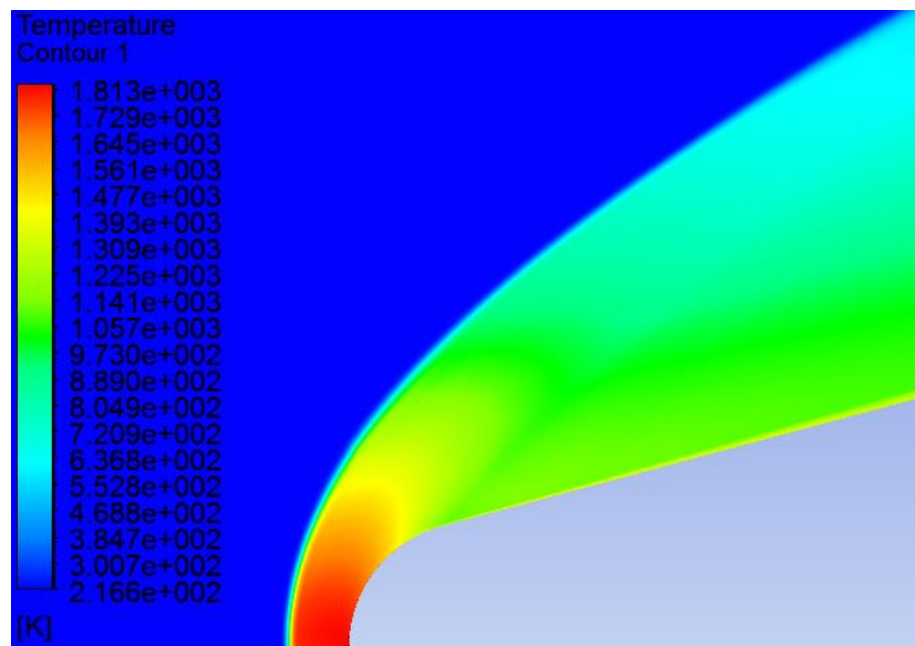


Рисунок 3.14. Визуализация результатов численного моделирования – распределение поля температуры в расчётной области

С использованием разработанной математической модели проведена серия вычислительных экспериментов по моделированию обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой [18, 64].

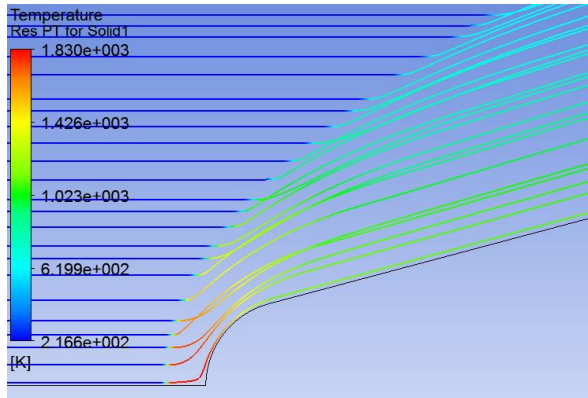
Для оценки влияния размеров «К-фазы» на физическую картину протекания исследуемого процесса численное моделирование проводилось для разной дисперсности частиц.

В этой связи полидисперсность частиц разделена на три группы:

- первая группа – частицы дисперсностью  $d_p = 1 \div 10$  мкм;
- вторая группа – частицы дисперсностью  $d_p = 11 \div 20$  мкм;
- третья группа – частицы дисперсностью  $d_p = 21 \div 30$  мкм.

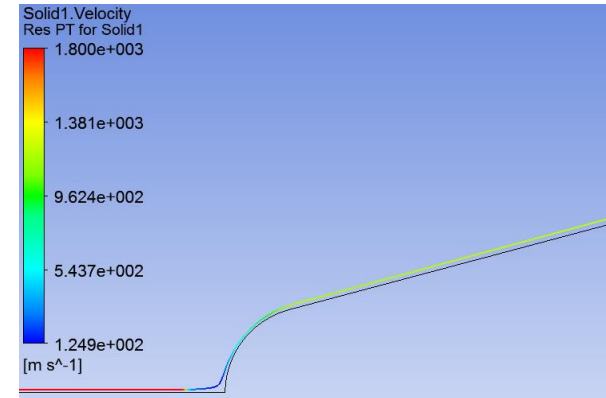
Результаты численных экспериментов представлены на рисунках 3.15÷3.19 [68]. Для большей наглядности визуализация результатов для каждой группы частиц включала:

- картину траекторий течения всех полидисперсных частиц вблизи поверхности КЛА;
- картину траектории течения вблизи поверхности КЛА выбранной частицы из каждой группы;
- графиков изменения параметров несущей фазы и выбранной частицы из каждой группы «К-фазы».

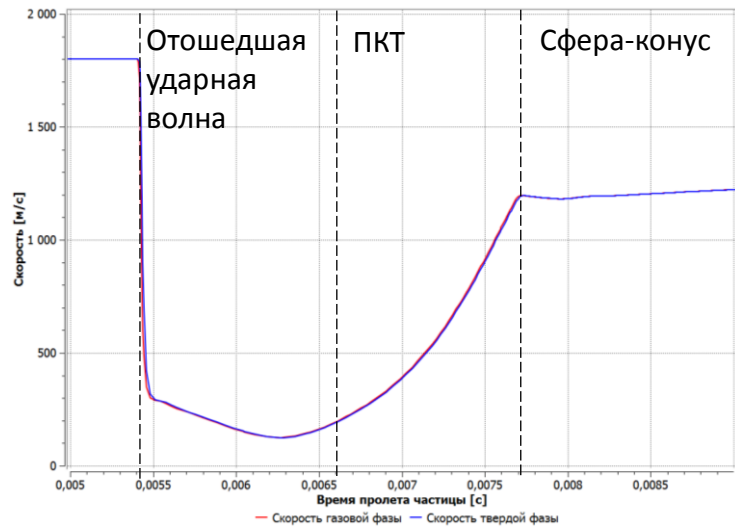
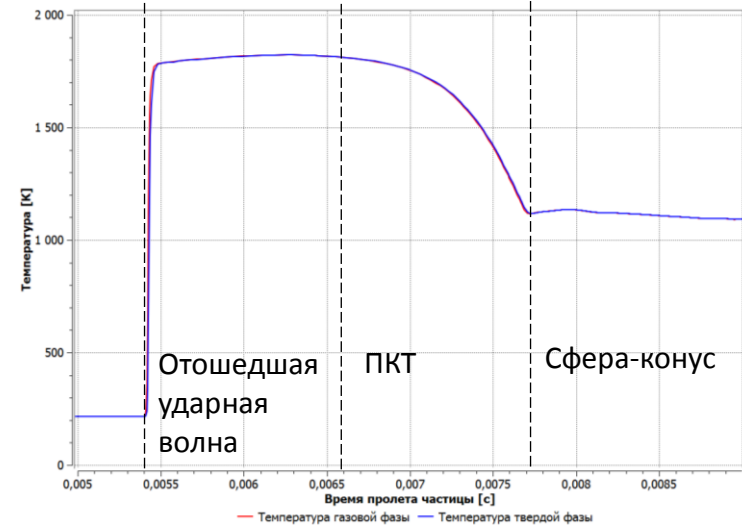


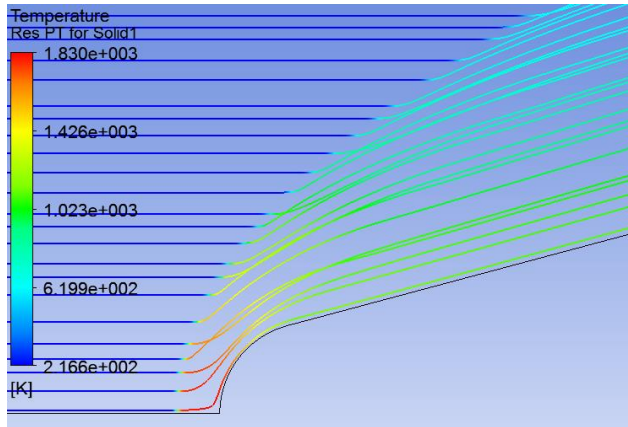
а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

(заливка цветом по значениям температуры частиц)

б) Траектория частицы  $d = 1,72$  мкм

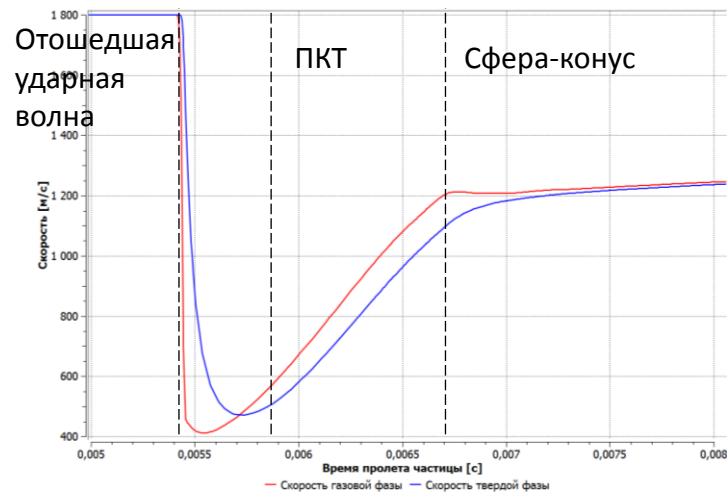
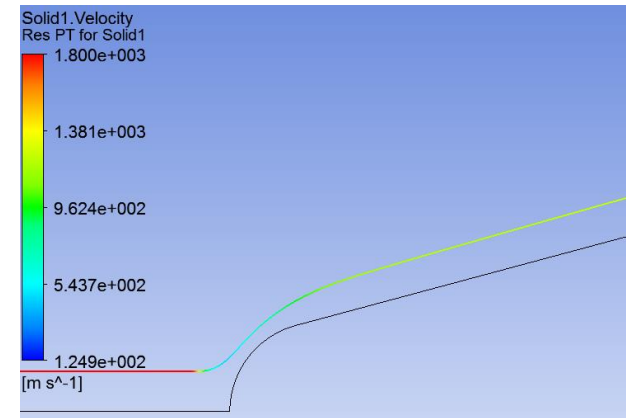
(заливка цветом по значению скорости частицы)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица  $d = 1,72$  мкм)г) Температура газовой и твердой фазы (частица  $d = 1,72$  мкм)Рисунок 3.15. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц  $d = 1-5$  мкм

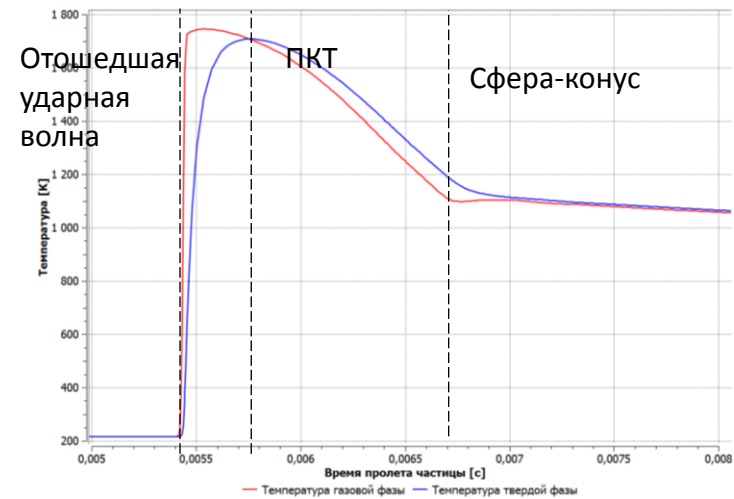


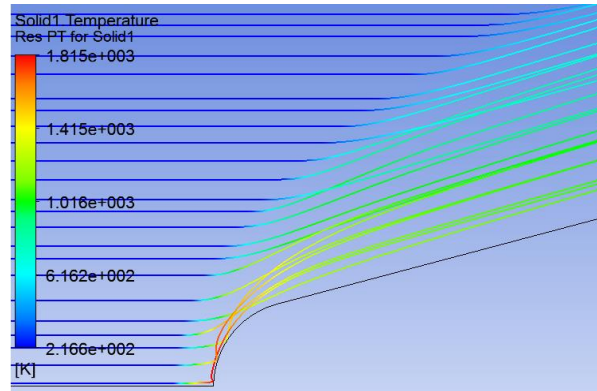
а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

(заливка цветом по значениям температуры частиц)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица  $d = 9$  мкм)б) Траектория частицы  $d = 9$  мкм

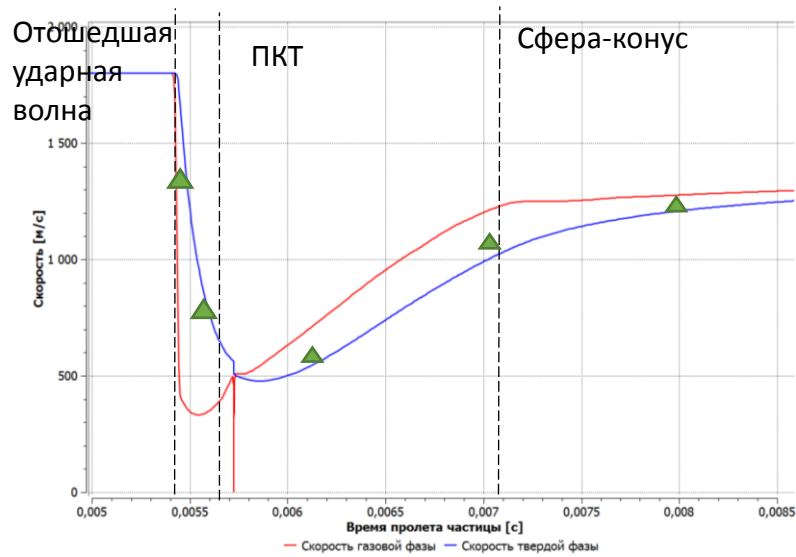
(заливка цветом по значению скорости частицы)

г) Температура газовой и твердой фазы (частица  $d = 9$  мкм)Рисунок 3.16. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц  $d = 5-10$  мкм

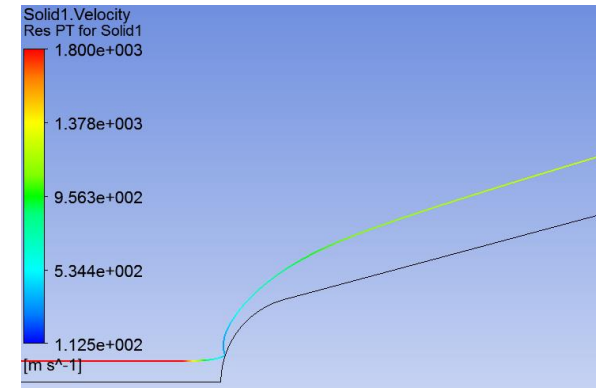


а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

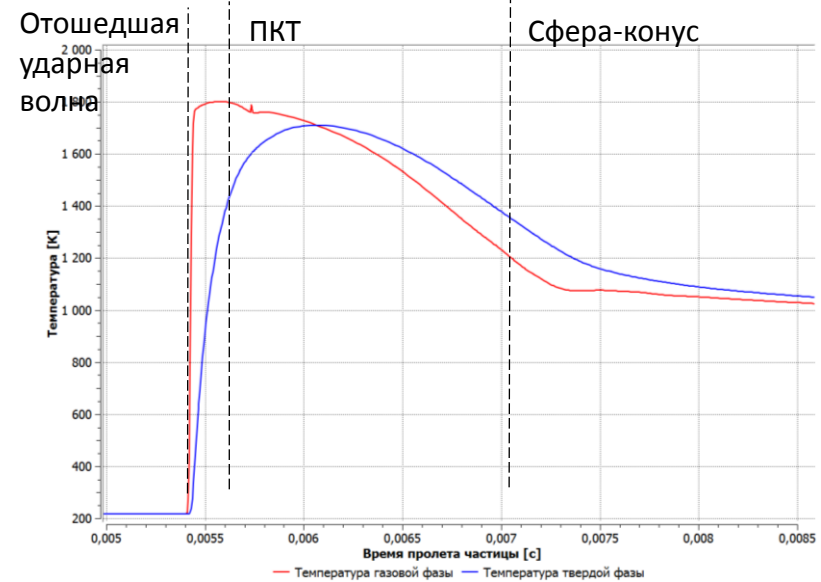
(заливка цветом по значениям температуры частиц)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица  $d = 15,8$  мкм)

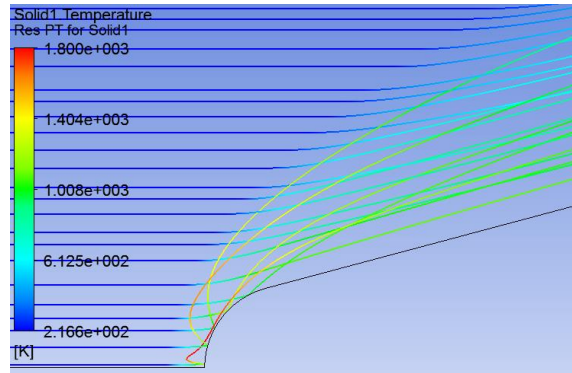
▲ - Экспериментальные данные МАИ. Грант РФФИ 07-08-00304-а

б) Траектория частицы  $d = 15,8$  мкм

(заливка цветом по значению скорости частицы)

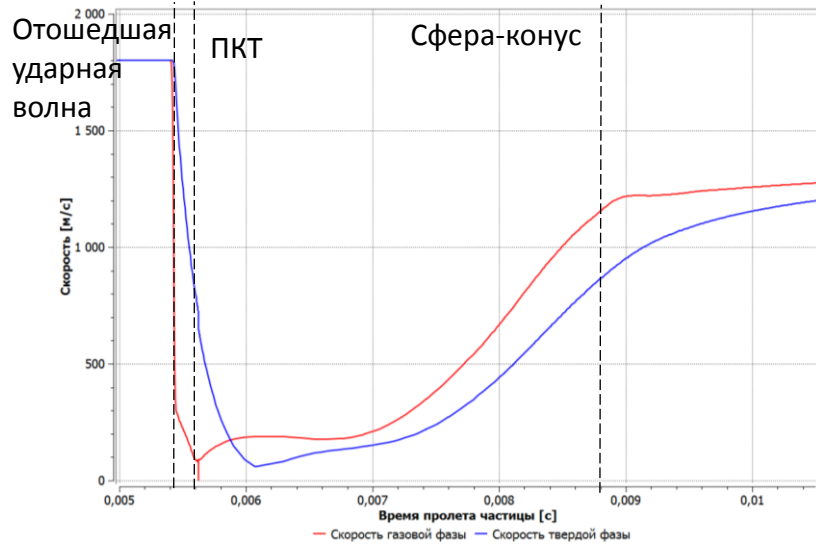
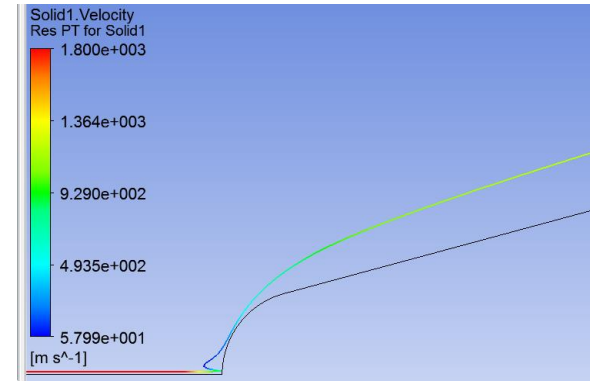
г) Температура газовой и твердой фазы (частица  $d = 15,8$  мкм)Рисунок 3.17. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц  $d = 11-20$  мкм



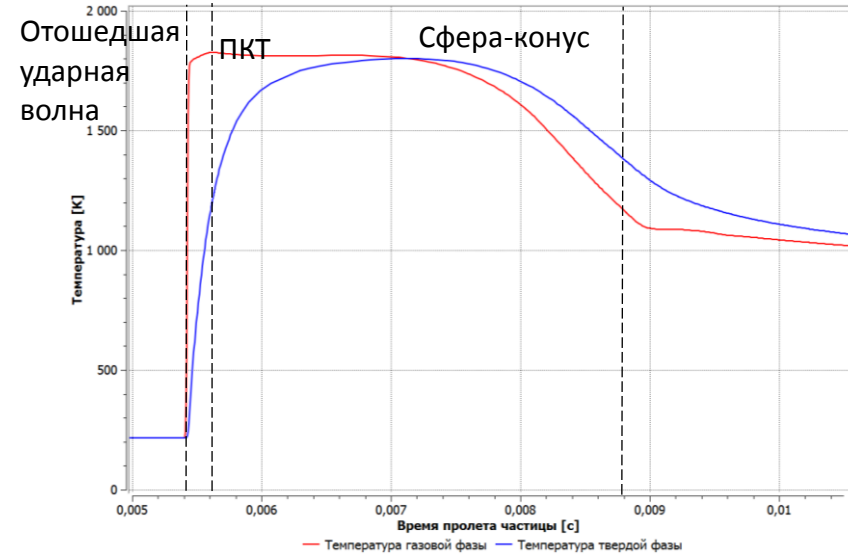


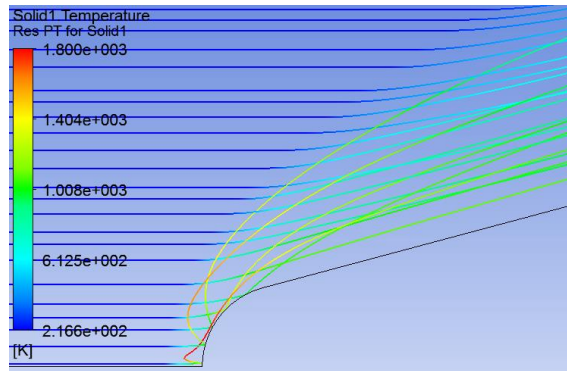
а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

(заливка цветом по значениям температуры частиц)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица  $d = 21,7$  мкм)б) Траектория частицы  $d = 21,7$  мкм

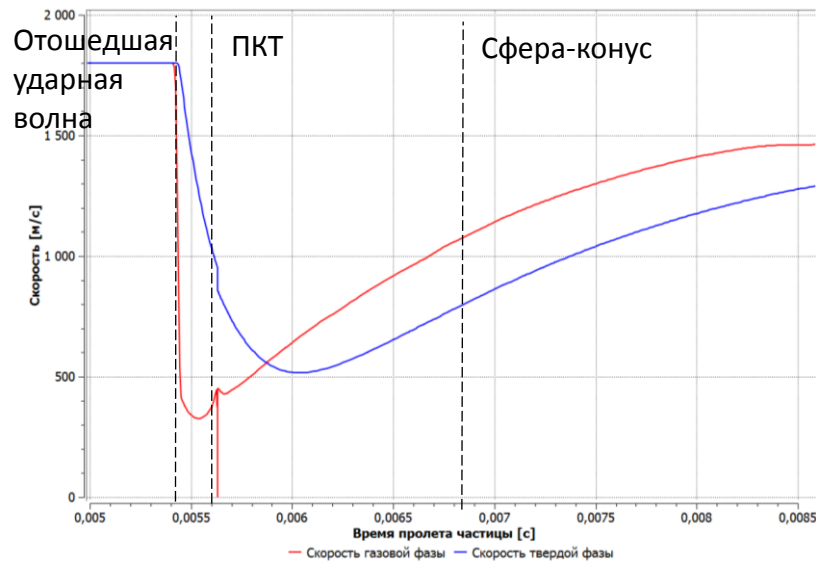
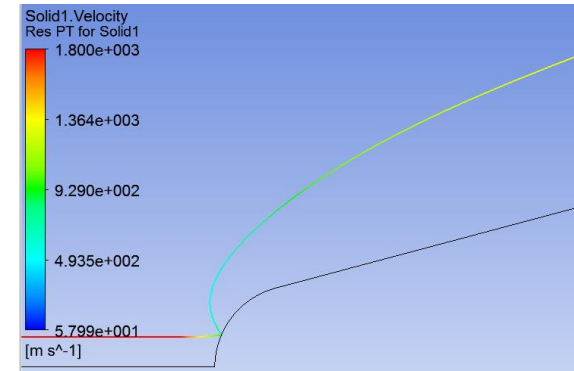
(заливка цветом по значению скорости частицы)

г) Температура газовой и твердой фазы (частица  $d = 21,7$  мкм)Рисунок 3.18. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц  $d = 20-25$  мкм

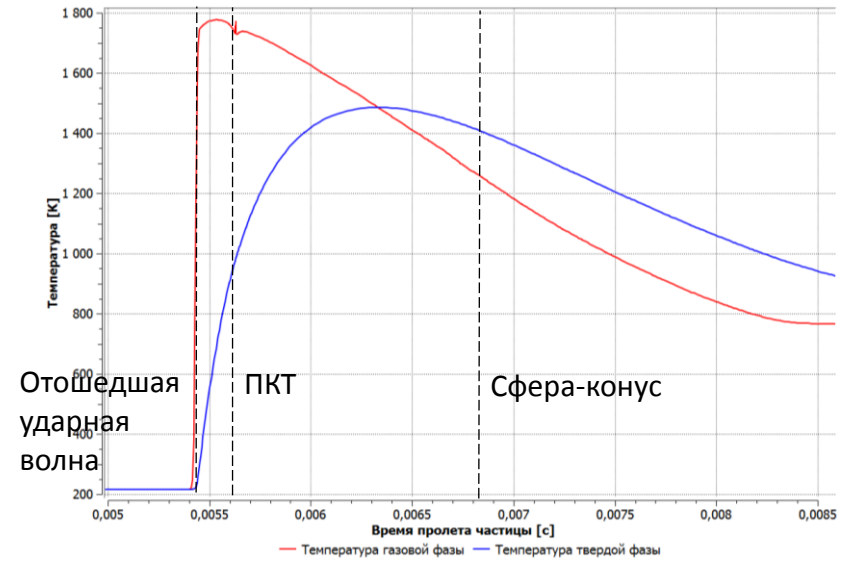


а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

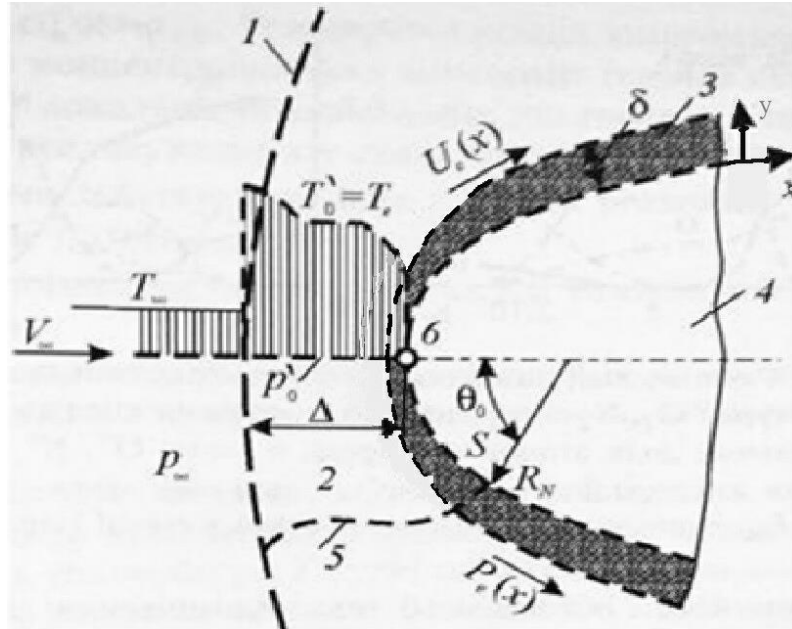
(заливка цветом по значениям температуры частиц)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица  $d = 28,9$  мкм)б) Траектория частицы  $d = 28,9$  мкм

(заливка цветом по значению скорости частицы)

г) Температура газовой и твердой фазы (частица  $d = 28,9$  мкм)Рисунок 3.19. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц  $d = 25-30$  мкм

Из анализа полученных результатов [18] видно, что при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела перед КЛА образуется отошедшая ударная волна и сжатый слой (рисунок 3.20) [2, 57].



1 – ударная волна, 2 – зона невязкого течения за ударной волной, 3 – пограничный слой, 4 – затупленной тело, 5 – линия перехода через скорость звука, 6 – точка торможения,  $\Delta$  – толщина сжатого слоя,  $\delta$  – толщина пограничного слоя,  $T_0^* = T_e$  – температура потока за ударной волной,  $\theta$  – угловая координата,  $T_\infty$  и  $V_\infty$  – температура и скорость невозмущенного потока

Рисунок 3.20. Картина обтекания затупленного тела в окрестности точки торможения.

Несущая фаза, проходя через ударную волну, замедляется и резко меняет свои параметры. Образуется так называемый сжатый (ударный) слой газа с повышенной плотностью. В следствие вязкости газа и торможения частиц происходит переход кинетической энергии потока в тепловую. Течение между поверхностью тела и ударной волной дозвуковое, но по мере движения вдоль тела поток вновь разгоняется и по прохождении так называемой звуковой линии становится сверхзвуковым [57, 69]. Соответственно, параметры твердой фазы

изменяются аналогично, но в силу инерционности «К-фазы», проходя ударную волну, они не изменяются скачкообразно. Как видно из представленных результатов инерционность «К-фазы» зависит от массы частицы: чем больше масса частицы, тем больше инерционность при изменении ее параметров. На протяжении всего сжатого слоя и вдоль тела параметры твёрдой фазы «стремятся» достичь величин параметров газовой фазы.

При рассмотрении графических иллюстраций результатов численного моделирования для частиц, которые соударяются с поверхностью КЛА (рисунки 3.17÷3.19), следует отметить следующую особенность. В программном комплексе ANSYS CFX скорость предполагается постоянной в пределах контрольного объема. Это постоянное значение хранится в узле контрольного объема. И хотя узел половинного пристенного контрольного объема лежит строго на стенке, скорость в нем ненулевая, чтобы обеспечить консервативность. То есть мы задаем нулевую скорость на стенке, но, поскольку первая ячейка на стенке имеет конечные размеры, "средняя" скорость в ней не равна нулю. Поэтому в ANSYS CFX существует два варианта переменных [65]:

1) «Hybrid»: в этом случае значения переменных строго соответствуют граничным условиям. Например, скорость, вычисленная на стенке с прилипанием, будет всегда равна скорости стенки.

2) «Conservative»: в этом случае значения переменных не строго соответствуют граничным условиям, но стремятся к заданным значениям при сгущении сетки.

Если вычислить скорость, то она не будет равна скорости стенки, однако обеспечит консервативность при вычислениях.

Ввиду вышесказанного, обращаем внимание на то, что для переменных, обозначающих параметры «К-фазы», в программном комплексе Ansys CFX нет значений в формате «Hybrid», поэтому на графических иллюстрациях в моменты времени, соответствующие соударению частицы и поверхности КЛА, скорость «К-фазы» не равна нулю.

### Выводы по главе 3

1. Сформулирована постановка задачи обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. Указаны основные параметры гетерогенного потока и высокоскоростного ЛА;
2. Разработана математическая модель газовой фазы и «К-фазы» для решения поставленной задачи;
3. Выбран инструмент для решения поставленной задачи. Произведен критический анализ CFD комплекса ANSYS CFX. Выделены особенности численного решения математической модели поставленной задачи;
4. Разработана расчётная схема для решения задачи с использованием предложенной математической модели обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой;
5. Проведена серия вычислительных экспериментов для наборов частиц разной дисперсности.
6. Произведена визуализация и анализ полученных результатов. Показано, что:
  - при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела перед КЛА, как и в случае адекватного обтекания гомогенным гиперзвуковым потоком, образуется отошедшая ударная волна и сжатый слой;
  - параметры твердой фазы изменяются аналогично параметрам несущей фазы, но в силу инерционности «К-фазы», проходя ударную волну, они не изменяются скачкообразно;
  - скорость изменения параметров «К-фазы» зависит от размера частицы: чем больше масса частицы, тем больше инерционность при изменении ее параметров.

#### **4. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАТЕКАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЛИДИСПЕРСНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА НА ПЛОСКУЮ ПРЕГРАДУ**

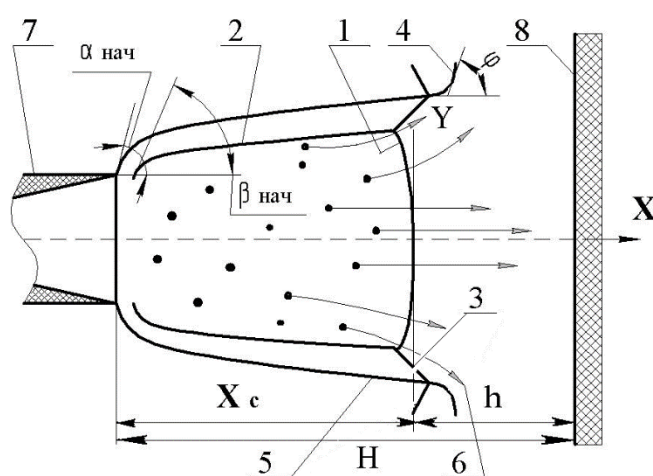
Анализ термо-газодинамики течения сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока при обтекании тела конической формы, притупленного сферой, проведён ранее в главе 3. При этом методом математического моделирования получены графические закономерности изменения термо-газодинамических параметров газовой и «К-фазы» вдоль поверхности тела. Подобные решения были проведены другими авторами в работах [14, 15, 43, 70, 71]. Результаты этих расчётов, а также данные ряда экспериментов [72] использованы для верификации математической модели, предложенной автором в главе 3.

Однако при постановке экспериментов на газодинамических стендах по исследованию теплозащитных и конструкционных материалов на эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ), как правило, используются образцы конечных размеров с плоским торцом. В таких исследованиях с целью определения скорости частиц в момент удара о поверхность приходится использовать различные методы диагностики в сочетании с расчётами. В этом случае приходится решать задачу натекания сверхзвуковой гетерогенной полидисперсной струи конечных размеров на преграду [1]. Ниже проведено решение такой задачи с анализом полученных результатов.

##### **4.1. Алгоритм расчёта скорости частиц при натекании сверхзвукового гетерогенного потока на плоскую преграду**

Схема осесимметричного течения сверхзвукового полидисперсного гетерогенного потока при его натекании на поверхность плоской стенки представлена на рисунок 4.1.

В общем случае задача двумерная, так как при переходе через отошедшую ударную волну и сжатый слой, вектора скоростей газовой и твердой фаз меняют свое направление. В работе предлагается приближенный подход к решению данной задачи. Предложенный алгоритм позволяет рассчитать параметры твердой фазы (частиц) непосредственно перед ударом о поверхность. Решение задачи проводится для двух участков. Первый из них - участок свободного течения гетерогенного потока распространяется от среза сопла до ударной волны. Данный участок определяется координатой вдоль оси потока  $X = H - h$  (рисунок 4.1).



1 – ударная волна, 2 – висячий скачок уплотнения, 3 – отраженный скачок уплотнения,  
4 – граница поворота потока, 5 – внешняя граница потока, 6 – траектории частиц, 7 –  
ускоритель, 8 – преграда,  $h$  – толщина сжатого слоя,  $X_c$  – координата ударной волны от среза  
ускорителя,  $\alpha_{нач}$  – начальная угловая координата отраженного скачка,  $\beta_{нач}$  – угловая координата  
висячего скачка,  $\varphi$  – текущая угловая координата поворота потока

Рисунок 4.1. Схема течения сверхзвукового гетерогенного потока на участке  $H$  от среза сопла до преграды

На этом участке газодинамика течения гетерогенного потока описывается уравнениями Прандтля-Майера [10, 73, 74].

Система уравнений позволяет рассчитать угол поворота потока  $\gamma$  в виде:

$$\gamma = \alpha - \varphi - (\alpha_{нач} + \varphi_{нач}), \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  – текущий угол распространения малых возмущений в потоке,  $\varphi$  – текущий угол наклона висячего скачка уплотнения,  $\alpha_{нач}$  – угол распространения малых

возмущений на срезе сопла,  $\varphi_{нач}$  - текущий угол наклона висячего скачка уплотнения на срезе сопла (рисунок 4.1).

В свою очередь из газовой динамики следует [54]:

$$\varphi_{нач} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arcsin \sqrt{\frac{k-1}{2} (\lambda_{cp}^2 - 1)}; \quad (4.2)$$

$$\alpha_{нач} = \arcsin \left( \frac{1}{M_{cp}} \right); \quad (4.3)$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arccos \left[ \sqrt{\frac{k+1}{2}} \left( \frac{P_n}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]; \quad (4.4)$$

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{1}{M} \right); \quad (4.5)$$

$$\lambda_{cp} = \frac{M_{cp}}{\left[ \frac{2}{k+1} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{cp}^2 \right) \right]^{1/2}}; \quad (4.6)$$

$$M = \frac{\left( \frac{2}{k+1} \lambda^2 \right)^{1/2}}{\left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{1/2}}; \quad (4.7)$$

$$\lambda(\varphi) = \left[ 1 + \frac{2}{k-1} \sin^2 \left( \varphi \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \right) \right], \quad (4.8)$$

где  $\lambda_{cp}$  и  $M_{cp}$  газодинамические функции на срезе сопла.

Решение системы (4.2) ÷ (4.8) осуществляется с использованием параметров гетерогенного потока на срезе сопла [1].

Расчет ведется методом итераций от среза сопла до сечения  $X_c$  (рисунок 4.1), которое рассчитывается с использованием соотношения [10, 43].

$$X_c = 0,745 d_{cp} M_{cp} \sqrt{kn} - 0,83 d_{cp} M_{cp} \exp \left( -1,73 \frac{X_p}{d_{cp} M_{cp} \sqrt{kn}} \right), \quad (4.9)$$

где  $d_{cp}$  и  $M_{cp}$  - диаметр среза сопла и число Маха на срезе сопла,  $n = P_{cp}/P_n$ ,  $P_n$  - давление окружающей среды.



Параметры газа за прямым скачком уплотнения (рисунок 4.1), вследствие того, что параметры частиц при переходе через ударную волну не претерпевают разрыва, определяются соотношения Ренкина – Гюгонио в виде:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} M_1^2 - \frac{k-1}{k+1}; \quad (4.10)$$

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2}; \quad (4.11)$$

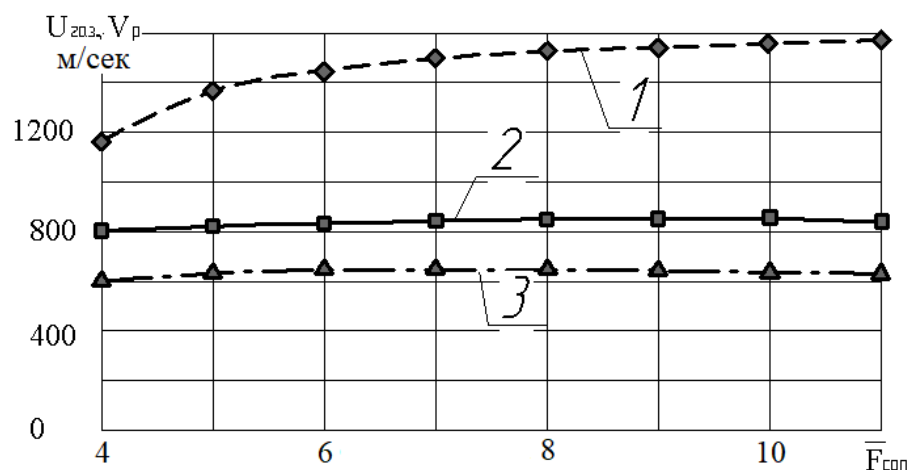
$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left( \frac{2}{k+1} \right) M_1^2 + \frac{k-1}{k+1}, \quad (4.12)$$

где индексы «1» и «2» представляют параметры газа до - и после скачка, соответственно.

Исходя из проведенного анализа, можно сформулировать общий алгоритм расчета параметров частиц, их скорость, температуру и распределение в сверхзвуковом гетерогенном потоке. Расчет проводится по нескольким последовательным этапам:

- по выбранному контуру ускорителя  $F(x)$  рассчитывается распределение скорости  $u_{газ}$  и давления  $p(x)$  газовой фазы по длине канала в плоть до его среза;
- используя соотношение (4.9), определяется координата  $X_C$  отошедшей ударной волны;
- решается система уравнений (4.10÷4.12) и определяются параметры газовой фазы за ударной волной.

Результаты расчета перед ударной волной изменения скорости газовой и твердой фазы разной дисперсности от степени расширения сопла приведены на рисунке 4.2.



1 – скорость газовой фазы, 2 – скорость частицы диаметром 20 мкм,  
3 – скорость частицы диаметром 40 мкм

Рисунок 4.2. Зависимость скорости газовой  $U_{газ}$  и твердой  $V_p$  фаз на срезе сопла от степени расширения

#### 4.2. Алгоритм расчета инерционного движения частиц сверхзвукового гетерогенного потока через ударную волну и сжатый слой

Наличие твердой фазы в общем случае может оказывать сильное влияние на газодинамику натекания на преграду (плоская стенка) сверхзвукового гетерогенного потока.

Однако если массовая концентрация твердой фазы составляет малую долю от газовой (не более 10%), то это влияние практически исчезает [75].

В такой постановке задача натекания сверхзвукового гетерогенного потока на преграду сводится к решению задачи взаимодействия с преградой сверхзвуковой газовой струи.

Такая задача достаточно хорошо исследована [76, 77].

В дальнейшем проведем анализ подобной задачи применительно к исследованию механизма взаимодействия сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока с плоской стенкой.

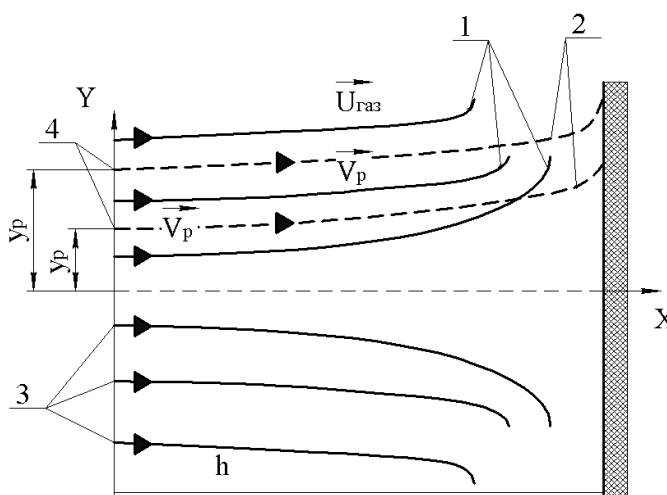
При решении задачи натекания сверхзвукового гетерогенного потока на преграду принималось, что массовая концентрация твердой фазы не превышает 10%.

В таком случае, механизм взаимодействия сверхзвукового гетерогенного потока с преградой можно считать устойчивым. Схема модели натекания сверхзвукового гетерогенного потока на преграду представлена на рисунке 4.3

Задачу будем решать при следующих допущениях:

- отошедшая ударная волна плоская;
- плотность газа, его температура и градиенты скорости в сжатом слое постоянны;

- коэффициенты релаксации скорости и температуры частиц постоянны и равны значениям, вычисленным по параметрам газа и частиц после прохождения ударной волны и сжатого слоя [78].



1 – линии тока газа, 2 – траектории частиц, 3 – вектор скорости газа  $\vec{U}_{\text{газ}}$ , 4 – вектор скорости частиц  $\vec{V}_p$ ,  $y_p$  – поперечные координаты частиц

Рисунок 4.3. Схема течения гетерогенной смеси в сжатом слое

Пусть  $u_{\text{газ}}$ ,  $T_{\text{газ}}$ ,  $\rho_{\text{газ}}$ ,  $\varphi_{v,\text{газ}}$  и  $\varphi_{T,\text{газ}}$  – соответствующие параметры газовой фазы.  $V_p$ ,  $T_p$ ,  $\rho_p$ ,  $\varphi_{v,p}$  и  $\varphi_{T,p}$  – соответствующие параметры твердой фазы (частиц). Тогда, решив уравнение неразрывности с учетом принятых допущений, получим выражение для поля скоростей газовой фазы за плоской ударной волной:

$$u(x) = u_{\text{газ}} \left(1 - \frac{x}{h}\right), \quad (4.13)$$

$$v(y) = \frac{u_{\text{газ}}}{(\gamma+1)h} y, \quad (4.14)$$

где  $x$  и  $y$  – текущие координаты,  $h$  – см. рисунок 4.1,  $\gamma = 0$  для плоского и  $\gamma = 1$  для осесимметричного случаев. При этом  $y = y_{\text{max}} = R_{\text{cm}}$  – радиус потока перед ударной волной.

Уравнения движения и энергии для частиц с соответствующими граничными условиями имеет вид [78]:

- уравнения движения:

по координате  $X$

$$\ddot{x}_p = \varphi_{V,p} \left[ u_{\text{газ}} \left( 1 - \frac{x_p}{h} \right) - \dot{x}_p \right], \quad (4.15)$$

по координате  $Y$

$$\ddot{y}_p = \varphi_{V,p} \left[ u_{\text{газ}} \left( \frac{u_{\text{газ}}}{(\gamma+1)h} \frac{y_p}{h} \right) - \dot{y}_p \right], \quad (4.16)$$

начальные условия:  $\dot{x}_p = V_p$  при  $\tau = 0$ ,  $x_p = 0$  при  $\tau = 0$ ,  $\dot{y}_p = V_{p,y}$ , при  $\tau = 0$ ,  $y_p = R_{\text{ст}}$  при  $\tau = 0$ .

- уравнение энергии:

$$T_p = \varphi_{T,p} (T_{\text{газ}} - T_{p,\text{нач}}) \quad (4.17)$$

при следующих начальных условиях:  $T_p = T_{p,\text{нач}}$ , при  $\tau = 0$ .

Система координат для сформулированной задачи приведена на рисунке 4.3.

Дифференциальные уравнения (4.15÷4.17) являются линейными с постоянными коэффициентами. Их решения имеют следующий вид [46]:

- координата по направлению  $X$ :

$$x_p = h + \frac{V_p + h\lambda_{2,x}}{\lambda_{1,x} - \lambda_{2,x}} \exp(\lambda_{1,x}) + \frac{V_p + h\lambda_{1,x}}{\lambda_{2,x} - \lambda_{1,x}} \exp(\lambda_{2,x}), \quad (4.18)$$

где  $\lambda_{x_{1,2}} = -\frac{\varphi_{V,p}}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4u_{\text{газ}}}{\varphi_{V,p}h}} \right)$

- координата по направлению  $Y$ :

$$y_p = \frac{V_p - y_{p,\text{нач}} \lambda_{2,y}}{\lambda_{1,y} - \lambda_{2,y}} \exp(\lambda_{1,y}) + \frac{V_p - y_{p,\text{нач}} \lambda_{1,y}}{\lambda_{2,y} - \lambda_{1,y}} \exp(\lambda_{2,y}), \quad (4.19)$$

где  $\lambda_{y_{1,2}} = -\frac{\varphi_{V,p}}{2} \left( 1 \pm \frac{4V_p}{(\gamma-1)\varphi_{V,p}h} \right)$ .

- температура частицы:

$$T_p = T_{\text{газ, сж.}} - (T_{\text{газ, сж.}} - T_{p,\text{нач}}) \exp(-\varphi_{T,p}). \quad (4.20)$$

Коэффициенты  $\varphi_{V,p}$  и  $\varphi_{T,p}$  в уравнениях (4.18) и (4.19) зависят от режима обтекания частицы потоком газа-носителя, её диаметра и определяются следующими соотношениями [78]:

$$\varphi_{V,p} = \frac{3 \rho_{\text{газ}} (u_{\text{газ}} - V_p)}{4 \rho_p \cdot d_p} C_f (Re_{d_p}, M), \quad *$$

$$\varphi_{T,p} = 6 \frac{Nu_{d_p} (Re_{d_p}, Pr) \lambda \cdot \rho_{\text{газ}} |u_{\text{газ}} - V_p|}{Re_{d_p} \cdot \eta_p \cdot \rho_p \cdot d_p \cdot c_p}. \quad **$$

где  $c_{p,m}$ ,  $\rho_p$ ,  $d_p$ ,  $c_p$ ,  $\lambda_{\text{газ}}$  - массовая концентрация твердой фазы в гетерогенном потоке, плотность материала частиц, диаметр частиц, удельная теплоемкость частиц и теплопроводность газа, соответственно.

Очевидно, полученные выражения (4.18) и (4.19) представляют траектории движения частиц на участке  $h$  между ударной волной и стенкой по направлениям  $x$  и  $y$ . Анализ этих уравнений позволит установить режимы течения частиц у поверхности преграды с позиции их возможного достижения поверхности.

Кроме того, из (4.20) следует, что температура частиц  $T_p$  монотонно стремится к температуре газа в сжатом слое.

Из анализа соотношений (4.18), (4.19) и (4.20) следует, что в общем случае возможны несколько режимов, которые могут реализоваться при взаимодействии сверхзвукового гетерогенного потока с плоской ограниченной стенкой.

Далее, проведем анализ с целью выявления условий, при которых возможна реализация тех или иных режимов.

### 4.3 Анализ режимов инерционного движения частиц в сжатом слое

Как следует из выражений (4.18) и (4.19), режим течения газовой и твердой фазы вблизи поверхности (участок  $h$ , рисунок 4.3) зависит от двух безразмерных комплексов для газа-носителя и частиц. Обозначим их  $K_{газ}$  и  $K_p$ , соответственно, то есть:

$$K_{газ} = \frac{u_{газ}}{\varphi_{V,p} h} \text{ и } K_p = \frac{V_p}{\varphi_{V,p} h}. \quad (4.21)$$

Отсюда просто получить зависимость:

$$K_p = K_{газ} \frac{V_p}{u_{газ}}. \quad (4.22)$$

Понятно, что  $K_p \leq K_{газ}$ . Однако для частиц субмикронного диапазона, когда  $u_{газ} = V_p$ , возможен случай, что  $K_p = K_{газ}$ .

Таким образом, два режима течения будут определяться значениями  $\lambda_{x_1}$  и  $\lambda_{x_2}$ , которые согласно (4.18), принимают вид:

$$\lambda_{x_1} = - \frac{\varphi_{V,газ}}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - 4K_{газ}} \right); \quad (4.23)$$

$$\lambda_{x_2} = - \frac{\varphi_{V,газ}}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - 4K_{газ}} \right). \quad (4.24)$$

Проведем анализ выражений (4.23) и (4.24) с целью выявления возможных режимов взаимодействия полидисперсной «К-фазы» при обтекании плоской стенки.

Как следует из (4.23) и (4.24)  $\lambda_{x_1}$  и  $\lambda_{x_2}$ , в общем случае, могут быть как действительными, так и мнимыми. Очевидно, если  $K_{газ} \leq 0,25$ , то  $\lambda_{x_1}$  и  $\lambda_{x_2}$  действительные числа. В противном случае они мнимые.

Проанализируем возможные варианты.

Вариант №1. Пусть  $K_{газ} < 0,25$ , а  $K_p < 0,5 \left( 1 + \sqrt{1 - 4K_{газ}} \right)$ .

Тогда из (4.23) и (4.24) следует, что  $\lambda_{x_1}$  и  $\lambda_{x_2}$  вещественны и не равны друг другу. Для такого режима течения решение уравнения движения частиц (4.15) при  $x_p > 0$  имеет вид:

- для координаты X:

$$x_p = h \left\{ 1 + \exp(-\bar{\tau}) \left[ \frac{2K_p - 1}{\Delta_x} \operatorname{sh}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) - \operatorname{ch}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) \right] \right\}, \quad (4.25)$$

- для скорости частиц:

$$V_p = V_{p, \text{ср}} \exp(-\bar{\tau}) \left[ \operatorname{ch}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) + \frac{1}{\Delta_x} \left( \frac{2K_{\text{газ}}}{K_p - 1} \right) \operatorname{sh}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) \right], \quad (4.26)$$

где  $\Delta_x = \sqrt{1 - 4K_{\text{газ}}}$ ,  $\bar{\tau} = \frac{\varphi_{V,p} \cdot \tau}{2}$ .

Анализируя поведение функций (4.25) и (4.26), можно показать, что при всех  $\bar{\tau} > 0$  функция  $V_p > 0$ , в то время как максимальное значение функции  $x_p < h$ .

Таким образом, в рассматриваемом варианте частицы не достигают поверхности и не вызывают её эрозии.

Вариант №2. Пусть  $K_{\text{газ}} = 0,25$ , а  $K_p \leq 0,5$ .

Тогда  $\lambda_{x_1}$  и  $\lambda_{x_2}$  вещественны и равны между собой. В таком случае, решение уравнения (3.36) упрощается и принимает вид:

- для координаты X:

$$x_p = h \left\{ 1 + \exp(-\bar{\tau}) \left[ \bar{\tau} (2K_p - 1) \right] \right\}; \quad (4.27)$$

- для скорости частиц:

$$V_p = V_{p, \text{ср}} \cdot \exp(-\bar{\tau}) \left[ 1 + \left( \frac{1}{2K_p} - 1 \right) \cdot \bar{\tau} \right]. \quad (4.28)$$

Нетрудно показать, что данный вариант аналогичен предыдущему, т.е. при всех  $\bar{\tau} > 0$  функция  $V_p > 0$ , в то время как значение функции  $x_p < h$ .

Таким образом, из проведенного анализа вытекает важный вывод: все частицы субмикронного диапазона не достигают поверхности преграды и сносятся вниз по потоку, т.е. не взаимодействуют с поверхностью.

Указанные режимы обнаружены экспериментально. Их реализация определяется плотностью материала частиц, их формой и дисперсностью. Например, если частицы субмикронного диапазона имеют форму далекую от сферической (например, чешуйчатая), то они, имея большое аэродинамическое сопротивление, тормозятся в сжатом слое и сносятся потоком газа-носителя вдоль стенки, не достигнув ее поверхности.

Очевидно, другие возможные варианты, возникающие из анализа выражений (4.25) и (4.26), определяют условие, когда  $x_p > h$ . Это означает, что траектории частиц таковы, что они достигнут поверхности преграды. На таких режимах интенсивность процесса взаимодействия частиц с поверхностью будет определяться несколькими параметрами. К ним относятся:

- время  $\tau$  пролёта частицами толщины сжатого слоя;
- скорость частиц разного диаметра  $V_{p,i}$  перед ударной волной;
- коэффициент  $N_{p,h}$ , учитывающий долю частиц, достигнувших поверхности,

в виде:

$$N_{p,h} = \frac{dy_p}{dy_{p,h}}; \quad (4.29)$$

- коэффициент  $M_{p,h}$ , учитывающий отношение площади гетерогенной струи, воздействующей на плоскую стенку, к площади струи до ударной волны

$$M_{p,h} = \frac{y_p^1 - y_p^2}{y_{p,h}^1 - y_{p,h}^2}; \quad (4.30)$$

- бесконечно малым массовым расходом частиц, пролетевших через площадь между двумя бесконечно малыми траекториями:

$$d\dot{m} = \rho_{p,фик} \cdot u_p \cdot dy_p = \rho_{p,h,фик} \cdot u_{p,h} \cdot dy_{p,h}. \quad (4.31)$$

В записанных формулах:  $y_p$ , и  $y_{p,h}$  координаты по оси  $U$  линий (траекторий) частиц до- и после ударной волны,  $y_p^1$  и  $y_p^2$  - координаты двух соседних



траекторий частиц до ударной волны,  $y_{p,h}^1$  и  $y_{p,h}^2$  - координаты двух соседних траекторий частиц после ударной волны,  $\rho_{p,фик}$  и  $\rho_{p,h фик}$  - фиктивные плотности частиц в элементарном объеме гетерогенной струи до- и после ударной волны, соответственно.

Обозначим их отношение в виде:

$$\bar{\rho}_p = \frac{\rho_{p,h фик}}{\rho_{p,фик}} = \frac{V_p}{V_{p,h}} M_{p,h}. \quad (4.32)$$

Так как  $\bar{\tau}_h$  не зависит от поперечной координаты  $Y$ , то преобразовав, (4.29) и поставив полученное выражение в (4.30), получим:

$$M_{p,h} = \exp(\bar{\tau}_h) \left[ \operatorname{ch}(\bar{\tau}_h \cdot \Delta_y) + \frac{1}{\Delta_y} \left( 1 + \frac{2dV_p}{\varphi_{V,p} \cdot dy_p} \right) \operatorname{sh}(\bar{\tau}_h \cdot \Delta_y) \right]. \quad (4.33)$$

Используя представленные выше величины, проведем дальнейший анализ с целью выявления возможных режимов движения частиц.

Вариант № 3. Пусть  $K_{газ} < 0,25$ , а  $K_p > 0,5(1 + \sqrt{1 - 4K_{газ}})$ .

Для данного варианта формула для расчета безразмерного времени пролета частицами толщины сжатого слоя имеет вид:

$$\bar{\tau}_{p,h} = \frac{1}{\Delta_x} \ln \left( \frac{2K_p - 1 + \Delta_x}{2K_p - 1 - \Delta_x} \right). \quad (4.34)$$

Подставляя рассчитанное значение  $\bar{\tau}_{p,h}$  последовательно в формулы (4.25) и (3.47a), находим скорость частицы  $V_{p,h}$  у поверхности подложки после преодоления ею ударной волны и сжатого слоя. Затем по (4.33) рассчитывается  $M_{p,h}$  и далее  $\bar{\rho}_p$ , используя (4.32).

Вариант № 4. Пусть  $K_{газ} = 0,25$ , а  $K_p > 0,5$ .

Для данного варианта формула для расчета безразмерного времени пролета частицами толщины сжатого слоя имеет вид:

$$\bar{\tau}_h = (2K_p - 1)^{-1}. \quad (4.35)$$

Далее, проведя операции, аналогичные предыдущему варианту, получим фиктивную плотность частиц достигнувших поверхности стенки и сформировавших покрытие.

В общем случае возможны и еще ряд режимов течения, когда частицы достигают поверхности. Например, режим, когда  $K_{газ} > 0,25$ , а  $K_p \geq 0,5$ . Однако анализ этого режима аналогичен предыдущим вариантам.

Результаты проведенного анализа позволили получить зависимость для оценки скорости частиц разного диаметра в момент взаимодействия с плоской стенкой после прохождения ими ударной волны и сжатого слоя в виде:

$$V_p = V_{p,cp} \exp(-\bar{\tau}) \left[ \operatorname{ch}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) + \frac{1}{\Delta_x} \left( \frac{2K_{газ}}{K_p} - 1 \right) \operatorname{sh}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) \right], \quad (4.36)$$

где, как и ранее,  $K_{газ} = \frac{u_{газ}}{\varphi_{V,p} h}$  и  $K_p = \frac{V_p}{\varphi_{V,p} h}$ ,  $\Delta_x = \sqrt{1 - 4K_{газ}}$ ,  $\bar{\tau} = \frac{\varphi_{V,p} \cdot \tau}{2}$ , а

$$\varphi_{V,p} = \frac{3 \rho_{газ} (u_{газ} - V_p)}{4 \rho_p \cdot d_p} C_f (Re_{d_p}, M).$$

Таким образом, согласно (4.36) скорость частицы после прохождения ударной волны и сжатого слоя зависит от многих параметров, в том числе от плотности материала частицы  $\rho_p$  и её диаметра  $d_p$ .

#### 4.4. Динамика удара твердой частицы о поверхность и сопутствующие процессы

Прежде всего, следует отметить, что динамика удара твердой частицы о подложку принципиально отличается от динамики удара жидкой частицы. Анализ удара жидкой частицы о поверхность показал [79, 80] что в гидродинамике удара возникают два рода давления:

- напорное или динамическое давление:

$$P_{дин} = \frac{\rho_p \cdot V_p^2}{2}; \quad (4.37)$$

- ударное, импульсное давление  $P_{уд}$  обусловленное возникновением гидравлического удара в объеме жидкой капли:

$$P_{уд} \sim \frac{\rho_p \cdot a_{зв} \cdot V_p}{2}. \quad (4.38)$$

Импульсное давление  $P_{уд}$  является результатом действия упругих волн сжатия (ударных волн), возникающих в объеме жидкой капли.

При взаимодействии твердых частиц с преградой  $P_{уд}$  отсутствует, так как гидроудар не реализуется, и в зоне контакта при ударе действует только напорное, динамическое давление. Действие напорного давления определяет длительность удара  $\tau_{уд}$ .

В сверхзвуковых гетерогенных потоках, в которых уровни скоростей частиц достигают значений  $V_p = 600 \div 1200$  м/с, динамическое давление в зоне контакта может достигать максимальных значений – до  $\sim 10^{10}$  Па. Это значительно превосходит предельные значения механических свойств большинства материалов. Установлено, что ударное действие динамического давления вызывает как разрушение поверхностного слоя материала, так и дробление падающих частиц.

Как известно, при ударе высокоскоростной частицы о твёрдую поверхность, уровень среднего динамического давления на площади пятна контакта можно оценить по формуле [81]:

$$p_{дин} = \frac{\rho_p \cdot V_p^2}{2}. \quad (4.39)$$

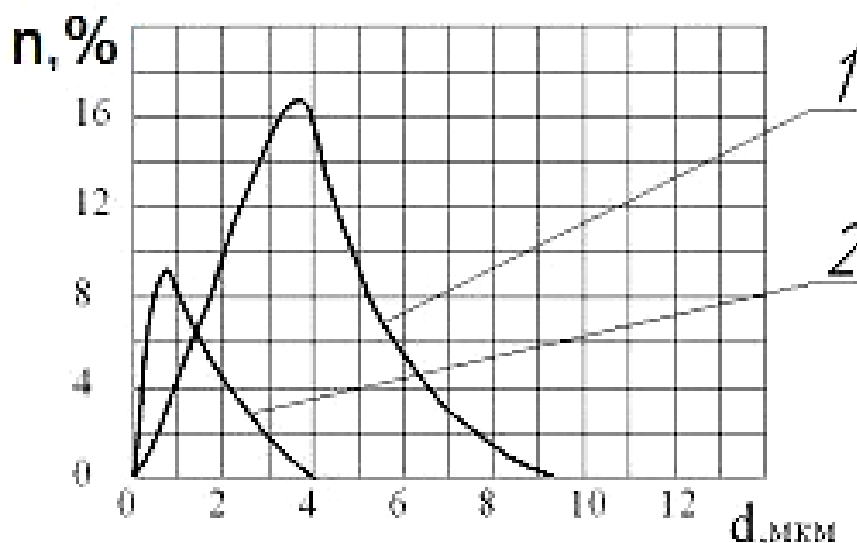
Например, при взаимодействии частицы алюминия на подложку со скоростью  $V_p = 500$  м/с, величина динамического давления в пятне контакта составит  $p_{дин} = 340$  МПа.

#### **4.4.1. Механические процессы при ударе высокоскоростных частиц о твёрдую поверхность.**

Дробление частиц при ударе.

При соударении высокоскоростных частиц с подложкой вследствие высокого напорного давления реализуется процесс диссипации кинетической энергии частиц. Это вызывает значительное повышение локальной температуры частицы и преграды в зоне удара.

Из физики твёрдого тела известно, что ударное приложение нагрузки вызывает образование в твердом теле ударных волн, их интерференцию [82, 83]. Все эти сложные теплофизические процессы вызывают как эрозию поверхности, так и деформацию и дробление исходных частиц при ударе. Процесс дробления частиц при ударе о преграду обнаружен в результате структурного анализа покрытий, сформированных частицами значительных размеров ( $d_p > 20\text{мкм}$ ) [84]. Например, результаты исследования процесса дробления частиц Ni при ударе о подложку приведены на рисунке 4.4.



1 – дисперсия частиц в исходном порошке, 2 - дисперсия частиц в покрытии, после удара о преграду

Рисунок 4.4. Изменение дисперсности частиц никеля при ударе

Изменение механических свойств материала обрабатываемой поверхности при ударе.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа покрытий, полученным на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2, физическая ширина рентгеновских линий (за исключением цинка) несколько возрастает по сравнению с таковыми у исходных частиц порошка. Этот несколько необычный результат. В этой связи определим уровни динамического давления при соударении разнородных частиц с преградой из сплава Д16.

Для проведения расчетной процедуры воспользуемся следующей формулой [85]:

$$P_{\text{дин}} = \frac{\rho_p \cdot a_p \cdot V_p}{1 + \left( \frac{\rho_p \cdot a_p}{\rho_{\text{подл}} \cdot a_{\text{подл}}} \right)}, \quad (4.40)$$

где  $\rho_p$ ,  $\rho_{\text{подл}}$ ,  $a_p$ ,  $a_{\text{подл}}$  - плотности и скорости звука материалов частицы и подложки, соответственно,  $V_p$  - скорость частицы в момент удара о подложку. Соотношение (4.40) получено с использованием положений физики твердого тела. Оно удобно при расчетах в связи с доступностью исходных данных.

Результаты расчета уровней динамического давления при соударении частиц из разного рода металлов с подложкой (сплав Д16) приведены в таблице 4.1. Скорость частиц в момент удара  $V_p = 600$  м/с

Таблица 4.1. Давление в пятне контакта при соударении частиц с подложкой.

Материал частицы	Fe	Co	Al	Cu	Zn	Ni
Давление, ГПа	13,81	12,76	5,11	10,0	7,93	12,7

Все приведенные в таблице значения давлений превышают величину предела текучести Гюгонио для выбранных материалов частиц. Динамический предел текучести для большинства металлов изменяется в интервале  $0,1...2,5$  ГПа. Например, для железа  $P_{\text{дин}} = 0,61$  ГПа, для сплава Д16 -  $P_{\text{дин}} = 0,54$  ГПа [86]. Следовательно, при скорости частиц  $V_p = 600$  м/с и все виды частиц, используемые в расчете, а также и подложка пластически деформируются, что сопровождается

выбросом с поверхности стенки порции материала (процесс эрозии). Уровни динамических давлений при соударении столь высоки, что в процессе удара осуществляется деформационное упрочнение материала частицы. Это подтверждается исследованиями по оценке микротвердостей частиц исходных порошков, проведенными на приборе ПМТ - 3 при нагрузке  $0,2 \text{ Н}$ . Результаты оценки микротвердостей частиц исходных порошков приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Значения микротвердости исходных материалов порошка и синтезированных из них покрытий

Материал частицы	Тип кристаллической решетки	Микротвердость исходного материала порошка, МПа	Микротвердость порошка после удара, МПа	Процентное соотношение микротвердостей %
Zn	ГПУ	400	650	163
Al	ГЦК	300	550	183
Си	ГЦК	600	1000	167
Cr	ОЦК	1150	2900	252
Fe	ОЦК	750	2100	280
Ni	ГЦК	1150	1800	156
Co	ГПУ	1150	3200	243

#### Энергия деформации подложки.

Энергия деформации подложки – это энергия, затрачиваемая на деформацию подложки. Физическим процессом при этом является пластическое сжатие материала подложки. Величина этой энергии определяется, главным образом, двумя факторами.

Глубиной проникновения частицы в тело подложки  $h_{сегм}$  (рисунок 4.5) и силой сопротивления сжатию материала подложки  $\bar{P}_{сопр}$ . В таком случае имеем:

$$E_{\text{деф.подл}} = \bar{P}_{\text{сопр}} \cdot h_{\text{сегм}}. \quad (4.41)$$

Для приближенной оценки величины  $h_{сегм}$  обратимся к одному из положений физики твердого тела, а именно к задаче определения твердости материалов по Бринеллю методом сферы [87]. В этом методе, как известно, применяется сфера, изготовленная из материала высокой твердости, чтобы исключить ее деформацию при ударе о подложку.

Очевидно, метод сферы Бринелля можно применить и к процессу взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с преградой, поскольку проникновение частицы в тело подложки в этом процессе реализуется в основном на начальной стадии взаимодействия частицы с подложкой, когда деформация падающей частицы еще не существенная. При последующем развитии удара, частица сильно деформируется. Последнее вызывает резкое увеличение площади контакта частицы с подложкой, т.е. резкое увеличение сопротивления проникновению деформированной частицы в тело подложки. Это мгновенно тормозит процесс проникновения частицы в тело подложки. В силу указанного, можно с высокой достоверностью считать, что глубина проникновения  $h_{\text{сегм}}$  частицы в тело подложки реализуется на начальной стадии удара. В таком случае, согласно Бринеллю имеем:

$$H_{\beta} = \frac{\bar{P}_{\text{сопр}}}{\pi d_p \left( d_p - \sqrt{d_p^2 - d_{\text{сегм}}^2} \right)}, \quad (4.42)$$

где  $\bar{P}_{\text{сопр}}$  - усредненная сила сопротивления, приложенная к частице со стороны подложки;  $d_p$  - диаметр частицы;  $d_{\text{сегм}}$  - диаметр сегмента (углубления).

Используя далее (4.42), получим:

$$\bar{P}_{\text{сопр}} = \pi d_p \left( d_p - \sqrt{d_p^2 - d_{\text{сегм}}^2} \right) H_{\beta}. \quad (4.43)$$

На рисунке 4.5 представлена геометрическая модель взаимодействия частицы с подложкой в начальный момент удара.

Тогда, для оценки глубины проникания частицы в материал, просто записать выражение в виде:

$$h_{\text{сегм}} = \frac{d_{\text{сф}} - \sqrt{d_{\text{сф}}^2 - d_{\text{сегм}}^2}}{2}, \quad (4.44)$$

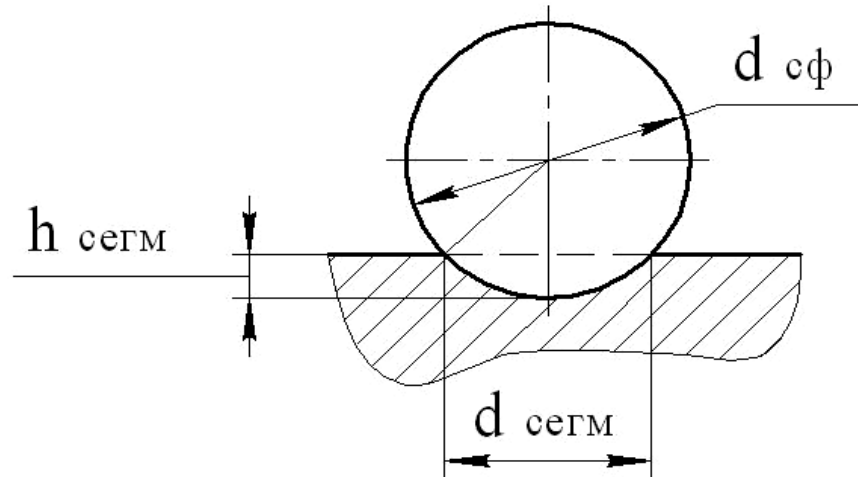
где  $d_{\text{сф}} = d_p$  - диаметр частицы.

Используя (4.44) преобразуем (4.43) к виду:

$$\bar{P}_{\text{сопр}} = 2\pi h_{\text{сегм}} \cdot d_p \cdot H_{\beta} . \quad (4.45)$$

Подставив (4.45) в (4.43), окончательно получим:

$$E_{\text{деф.подл}} = 2\pi h_{\text{сегм}}^2 \cdot d_p \cdot H_{\beta} . \quad (4.46)$$



$h_{\text{сегм}}$  – глубина проникновения частицы в подложку,  
 $d_{\text{сф}}$  – диаметр частицы перед ударом

Рисунок 4.5. Определение микротвердости материала по Бринеллю.

#### **4.4.2. Процессы теплообмена при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков с твёрдой стенкой. Энергия нагрева частицы и подложки**

Энергии, затраченные на нагревание частицы  $E_{\text{наг.р}}$  и подложки  $E_{\text{наг.под}}$ , можно представить в следующем виде:

$$\text{- для частицы: } E_{\text{наг.р}} = m_{\tau,р} \cdot c_p (\bar{T}_{\tau,р} - T_{\text{нач.р}}) , \quad (4.47)$$

где  $m_{\tau,р}$  – доля прогретой массы частицы за время удара  $\tau$ ,  $\bar{T}_{\tau,р}$  – среднemasсовая температура прогретого участка частицы,  $c_p$  – удельная теплоемкость материала частицы при температуре  $\bar{T}_{\tau,р}$ ;  $T_{\text{нач.р}}$  – средняя температура частицы перед ударом;

$$\text{- для подложки: } E_{\text{наг.подл}} = m_{\tau,подл} \cdot c_{\text{подл}} (\bar{T}_{\tau,подл} - T_{\text{нач.подл}}) , \quad (4.48)$$

где  $m_{\tau,подл}$  – доля прогретой массы подложки за время удара  $\tau$ ,  $\bar{T}_{\tau,подл}$  – среднemasсовая температура прогретого участка подложки,  $c_{\text{подл}}$  – удельная

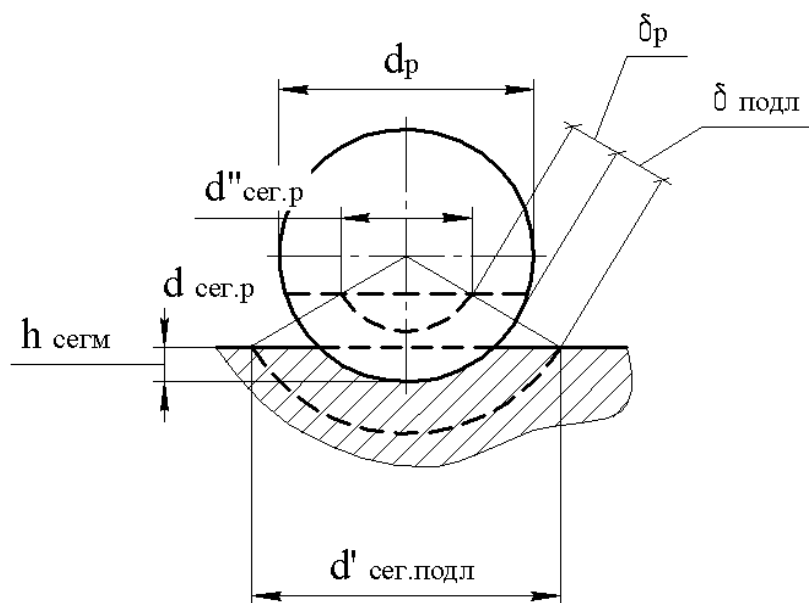


теплоемкость материала подложки при температуре  $\bar{T}_{\tau, \text{подл}}$ ,  $T_{\text{нач. подл}}$  – температура подложки перед ударом.

Из теории нестационарной теплопроводности известно, что длина, на которую распространится температурная волна за время нагрева (время экспозиции)  $\tau$ , определяется в виде  $\delta = \sqrt{a \cdot \tau}$ , где  $a$  – коэффициент температуропроводности тела. Тогда для процесса прогрева частицы за время удара (рисунок 4.6) имеем:

$$\delta_p = \sqrt{a_p \cdot \tau_{\text{уд}}}, \quad (4.49)$$

где  $\tau_{\text{уд}}$  – время удара, т.е. время, в течение которого частица деформируется от сферической формы до сфероидной,  $a_p$  – коэффициент температуропроводности материала частицы.



$d_p$  – исходный диаметр частицы,  $h_{\text{сегм}}$  – глубина проникновения частицы в подложку,  $d'_{\text{сег.подл.}}$  – диаметр сегмента деформации подложки,  $d_{\text{сег.п}}$  – диаметр прогретого сегмента частицы,  $d''_{\text{сег.п}}$  – диаметр непрогретого сегмента частицы,  $d'_{\text{сег.подл.}}$  – диаметр прогретого сегмента подложки,  $\delta_p$  – глубина прогрева частицы,  $\delta_{\text{подл}}$  – глубина прогрева подложки

Рисунок 4.6. Схема прогрева частицы и подложки при их взаимодействии

Для процесса прогрева подложки (рисунок 4.6) имеем:

$$\delta_{\text{подл}} = \sqrt{a_{\text{подл}} \cdot \tau_{\text{уд}}} . \quad (4.50)$$

Далее, используя (4.49) и (4.34) и рис. 4.10, определим массы прогретых участков частицы и подложки:

- для частицы:

$$m_{\tau, p} = V_{\text{пр. p}} \cdot \rho_p , \quad (4.51)$$

где  $V_{\text{пр. p}}$  – объем прогретого сегмента частицы,  $\rho_p$  - плотность материала частицы;

- для подложки:

$$m_{\tau, \text{подл}} = V_{\text{пр. подл}} \cdot \rho_{\text{подл}} , \quad (4.52)$$

где  $V_{\text{пр. подл}}$  – объем прогретого участка подложки,  $\rho_{\text{подл}}$  - плотность материала подложки.

В дальнейшем, с целью упрощения процедуры аналитических выкладок, будем считать, что форма частицы в момент прогрева сферическая. Очевидно, объем прогретого участка частицы (рисунок 4.6) можно представить в виде:

$$V_{\text{пр. p}} = V'_{\text{пр. сег}} - V''_{\text{непр. сег}} , \quad (4.53)$$

где  $V'_{\text{пр. сег}}$  - объем прогретого сегмента частицы с диаметром основания  $d_p$ ,  $V''_{\text{непр. сег}}$  - объем непрогретого сегмента частицы с диаметром основания  $d''_{\text{сег. p}}$ . Тогда имеем:

$$V'_{\text{сег. p}} = \frac{1}{3} \pi h_{\text{сег}}^2 (3R_p - h_{\text{сег}}) , \quad (4.54)$$

$$V''_{\text{непр. сег}} = \frac{1}{3} \pi \left\{ (h_{\text{сег}} - \delta_p) \left[ 3(R_p - \delta_p) - (h_{\text{сег}} - \delta_p) \right] \right\} , \quad (4.55)$$

где  $\delta_p$  - толщина прогретого слоя частицы за время удара  $\tau_{\text{уд}}$ . Преобразовав (4.55) с учетом (4.49) и малости значений  $h_{\text{сег}}$  и  $\delta_p$ , получим:

$$V''_{\text{непр. сег.}} = \pi R_p (h_{\text{сег.}} - \delta_p)^2 . \quad (4.56)$$

Подставив (4.37) и (4.39) в (4.36), окончательно получим:

$$V_{\text{пр. p}} = 2\pi R_p \cdot \delta_p (h_{\text{сег.}} - \delta_p) . \quad (4.57)$$

В итоге, с учетом (4.54) и (4.57) соотношение (4.51) принимает вид:

$$m_{\tau, p} = 2\pi R_p \cdot \delta_p (h_{\text{сег.}} - \delta_p) \cdot \rho_p. \quad (4.58)$$

Далее, согласно рисунку 4.5, объем прогретого участка подложки можно представить в виде:

$$V'_{\text{пр.подл}} = V_{\text{сег.подл}} - V'_{\text{сег.р}}, \quad (4.59)$$

где  $V'_{\text{сег.р}}$  представлено соотношением (4.37), а  $V_{\text{сег.подл}}$  - объем прогретого сегмента подложки с диаметром основания  $d'_{\text{сег.подл.}}$ .

Или:

$$V_{\text{сег.подл}} = \frac{1}{3} \pi (h_{\text{сег.}} + \delta_{\text{подл}})^2 [3(R_p + \delta_{\text{подл}}) - (h_{\text{сег.}} + \delta_{\text{подл}})]. \quad (4.60)$$

Подставив (4.60) и (4.54) в (4.59) и преобразовав с учетом малости значений  $\delta_p$ , получим:

$$V_{\text{пр.подл}} = \pi R_p \cdot \delta_{\text{подл}} (3h_{\text{сег.}} + \delta_{\text{подл}}) \quad (4.61)$$

В итоге, согласно (4.52) и с учетом (4.51) и (4.50) масса прогретого участка подложки равна:

$$m_{\tau, \text{подл}} = \pi R_p \cdot \delta_{\text{подл}} (3h_{\text{сег.}} + \delta_{\text{подл}}) \cdot \rho_{\text{подл}}. \quad (4.62)$$

Для оценки массы прогретых участков частицы и подложки необходимо рассчитать время удара.

#### 4.4.3. Время удара частицы о подложку

Экспериментально установлено (киносъемка) [80], что время растекания (деформации) жидкой частицы при ударе о твердую поверхность со скоростью  $V_{0,p}$  оценивается по формуле:

$$\tau_{\text{уд}} = \frac{(d_p - h_{\text{деф}})}{V_{0,p}}, \quad (4.63)$$

где  $h_{\text{деф}}$  – конечная толщина деформированной частицы. Преобразовав, получим:

$$\tau_{\text{уд}} = \frac{d_p (1 - \varepsilon)}{V_{0,p}}, \text{ где } \varepsilon - \text{ степень деформации частицы.}$$

В случае взаимодействия твердой частицы с подложкой записанная формула должна быть модифицирована, так как скорость деформации твердой частицы не будет равна скорости движения частицы перед ударом, как это установлено для жидкой частицы. Очевидно, для твердой частицы справедливо соотношение:

$$\tau_{\text{уд}} = \frac{d_p (1 - \varepsilon_p)}{V_{\text{деф. п}}}, \quad (4.64)$$

где  $\varepsilon_p = \frac{2b}{d_p}$  - степень деформации твердой частицы (рисунок 4.5),  $V_{\text{деф. п}}$  - скорость деформации твердой частицы.

Логично предположить, что скорость деформации твердой частицы  $V_{\text{деф. п}}$  будет отличаться от скорости деформации жидкой частицы  $V_{0, п}$  на величину, представляемую отношением поверхностного давления  $P_{\text{пов}}$  жидкой частицы, обусловленного поверхностным натяжением, к пределу текучести материала твердой частицы  $\sigma_{T, п}$ , т. е.:

$$V_{\text{деф. п}} = V_{0, п} \frac{P_{\text{пов}}}{\sigma_{T, п}}, \quad (4.65)$$

где, для жидкой частицы сферической формы диаметра  $d_{\text{жид. сф}}$ , согласно уравнению Лапласа:

$$P_{\text{пов}} = \frac{4\sigma_{\text{пов}}}{d_p}, \quad (4.66)$$

где  $\sigma_{\text{пов}}$  - поверхностное натяжение жидкой частицы (Н/м).

Подставив (4.66) в (4.65) и далее в (4.64), окончательно получим:

$$\tau_{\text{уд}} = \frac{r_p^2 (1 - \varepsilon_p)}{V_{0, п} \frac{\sigma_{\text{пов}}}{\sigma_{T, п}}}. \quad (4.67)$$

Таким образом, согласно (4.67) оценку длительности удара частицы о подложку можно осуществить при известных значениях нескольких параметров, таких как:

- размер частицы,  $r_p$  - радиус;
- скорость частицы в момент удара  $V_{0,p}$ ;
- степень деформации  $\varepsilon_p$  частицы (определяется экспериментально);
- поверхностное натяжение расплавленной частицы  $\sigma_{нов}$  и предела текучести твердой частицы  $\sigma_{T,p}$ .

Последний параметр, как известно, является функцией температуры частицы в момент удара  $T_p$  (справочные данные).

#### **4.5. Анализ особенностей эрозионного разрушения материалов при взаимодействии сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока с твёрдой стенкой**

Полученное решение поставленной выше задачи позволяет в дальнейшем провести исследование и выявить некоторые важнейшие особенности механизма взаимодействия высокоскоростных полидисперсных гетерогенных потоков с подложкой.

Ранее отмечалось, что все газотермические методы, используемые сегодня на стендах для получения высокотемпературных сверхзвуковых гетерогенных потоков (газопламенный, плазменный и детонационный, электродуговой и др.) обладают одной общей особенностью. Частицы в процессе ускорения в высокотемпературном потоке газа-носителя аккумулируют два вида энергии:

- энергию нагрева от начальной температуры до температуры пластификации или даже до температуры плавления:

$$I_{\text{наг}} = m_p \left( \int_{T_{\text{нач}}}^{T_{\text{пл}}} c_p dT + r_{\text{пл}} \right); \quad (4.68)$$

- кинетическую энергию, приобретаемую частицей при разгоне в потоке газа-носителя в виде:

$$E_{\text{кин}} = \frac{m_p V_p^2}{2}. \quad (4.69)$$

В отличие от условий испытаний на лабораторных стендах, в реальном полёте летательного аппарата с гиперзвуковой скоростью в атмосферных аномалиях, скорость столь высока, что выполняется условие:

$$E_{\text{кин}} \gg I_{\text{наг}}. \quad (4.70)$$

Это условие играет определяющую роль при взаимодействии гетерогенного потока с твёрдой стенкой.

Механизм взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с твердой поверхностью весьма сложный и зависит от рода удара. Например, при упругом ударе частицы о поверхность, какое-нибудь превращение энергии из одного вида в другой отсутствует. Частица отражается от подложки со скоростью, равной скорости падения. Понятно, что при таком ударе процесс эрозии поверхности отсутствует.

Назовем предельную скорость частицы, при которой ещё реализуется упругий удар, первой критической скоростью  $V'_{p, \text{кр}}$ .

Очевидно, можно также предсказать наличие некоей второй критической скорости  $V''_{p, \text{кр}}$ , при которой твердая поверхность начинает механически разрушаться, то есть реализуется процесс эрозии материала поверхности. Ранее было показано, что указанные критические скорости можно рассчитать, используя законы механики сплошной среды. С позиции поставленной в данной работе цели, практический интерес представляет оценка скорости частицы в момент её удара о поверхность, т.е.  $V_p \geq V_{p, \text{кр}}$ .

Ранее проведен краткий анализ по определению скорости одиночной сферической частицы, перемещающейся в газовом потоке. Результаты анализа могут быть перенесены и на гетерогенный полидисперсный поток, однако при этом должно строго выполняться условие, что поток имеет малую объемную концентрацию «К-фазы», не более 10% от газовой фазы. В этом случае взаимное влияние частиц как на движение относительно друг друга, так и на параметры газа-

носителя, несущественно. Установлено [74], что указанное условие выполняется, если:

$$\frac{l_p}{d_p} = 0,5 \cdot X_i^{-0,3} < 3, \quad (4.71)$$

где  $X_i$  – мольная доля частиц в гетерогенной смеси,  $l_p$  – расстояние между частицами в потоке,  $d_p$  – диаметр частиц.

В случае выполнения указанной выше концепции можно провести общий анализ для оценки критической скорости  $V_p''$ . При  $V_p = V_p''$  подложка начинает разрушаться от воздействия твердых частиц. В таком случае, необходимо составить уравнение баланса энергии, т.е. описать распределение кинетической энергии потока частиц, массой  $m_{поток}$  затраченной на прогрев и разрушение поверхности материала.

Очевидно, для полидисперсного гетерогенного потока кинетическая энергия, достигающая поверхности и производящая разрушение материала подложки и частиц, может быть представлена в виде:

$$E_{\Sigma,гетер.} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot m_i \cdot V_{p,i}^2}{2}, \quad (4.72)$$

$n_i$  – доля  $i$ -ых частиц одинаковой дисперсности (одинакового диаметра  $d_i$ ) в составе порошка,  $V_{p,i}$  – скорость  $i$ -ых частиц этой доли (см. рисунок 4.7).

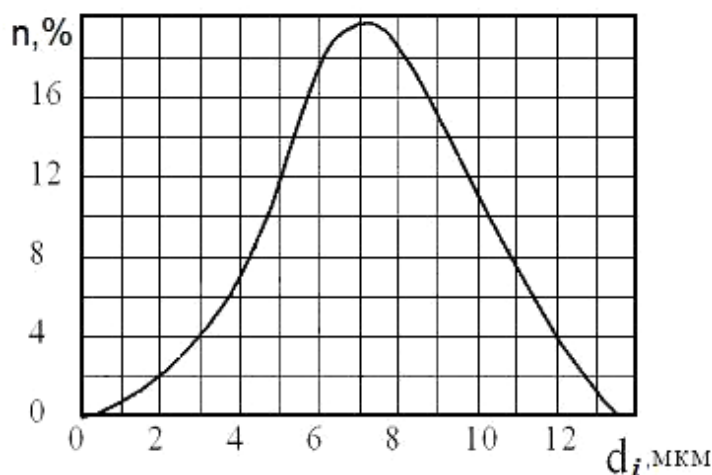


Рисунок 4.7. Распределение по диаметру частиц в полидисперсном порошке из меди

С учётом указанного на рисунке распределения уравнение баланса энергии на обрабатываемой поверхности в символах принимает вид:

$$E_{\Sigma, \text{гетер.}} = E_{\text{прогр.}} + E_{\text{ф.п.}} + E_{\text{мех. эр. подл}} + E_{\text{разр. частиц}}, \quad (4.73)$$

где  $E_{\text{прогр.}} = \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \bar{C}_P (T_{\text{уд.}} - T_{\text{нач.}})$  - энергия, затраченная на нагрев материала. В

свою очередь,  $T_{\text{уд.}}$  - температура материала в зоне удара,  $T_{\text{нач.}}$  - температура

материала до удара.  $E_{\text{ф.п.}} = \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot h_{i, \text{ф.п.}}$  - энергия, затраченная на возможные

фазовые переходы,  $E_{\text{мех. эр. подл}} = \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot I_{\text{эр. подл}}$  - энергия, затраченная на

эрозионное разрушение материала частицами гетерогенного потока,  $E_{\text{разр. частиц}} =$

$\sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot Q_{\text{дробл. частиц}}$  - энергия, затраченная на разрушение частиц при

взаимодействии с преградой.

В конечном счёте соотношение (4.73) принимает вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot m_i \cdot V_{p,i}^2}{2} &= \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \bar{C}_P (T_{\text{уд.}} - T_{\text{нач.}}) + \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot h_{i, \text{ф.п.}} + \\ &+ \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot I_{\text{эр.}} + \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot Q_{\text{дробл. частиц}}. \end{aligned} \quad (4.74)$$

В уравнении (4.74) по аналогии с  $I_{\text{эф}}$  ТЗМ при термохимическом разрушении ТЗМ [74] введено понятие эффективной энтальпии эрозии материала поверхности

в виде:  $I_{\text{эр}} = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_{\text{эр}}} \cdot \frac{V_p^2}{2}$ .

Анализ показал, что составляющие правой части уравнения баланса энергии, такие как  $E_{\text{прогр.}} \ll E_{\text{мех. эр. подл.}}$ ,  $E_{\text{ф.п.}} \ll E_{\text{мех. эр. подл.}}$ ,  $E_{\text{разр. частиц}} \ll E_{\text{мех. эр. подл}}$

В таком случае в первом приближении этими долями энергии можно пренебречь. Тогда после преобразования соотношение (4.74) принимает вид:



$$V_{p,i,эp} = 1,41 \sqrt{\frac{\sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \nu_{эp} \cdot I_{эp}}{\sum_{i=1}^k n_i \cdot m_i}}. \quad (4.75)$$

Как видно, соотношение (4.75) не соответствует соотношению, полученному в работе [53].

В настоящее время в инженерной практике непосредственное использование формулы (4.75) для оценки критической скорости эрозии не всегда возможно, поскольку значения эффективной энтальпий разрушения для большинства материалов не известны, так как этот параметр определяется экспериментально. Однако, используя имеющиеся в публикациях данные, в работе проведена оценка величин критической скорости эрозии для разного рода материалов. Например, для подложки из меди М-1 ( $T_{пл}=1356\text{ K}$ ) значение критической скорости частицы, вызывающую эрозию медной поверхности, составляет  $V_p = 1230\text{ м/сек}^1$ .

Определение критических скоростей эрозии для разных типов материалов можно выполнять, если имеется алгоритм расчета скорости частиц  $V_{p\text{ кр}}$  в момент удара. Такой алгоритм предложен в разделе 4.3 данной работы. Эта скорость зависит от рода материала частиц, их диаметра, а также характеристик гетерогенного потока на выходе из сопла.

В дальнейшем, уравнение баланса энергии (4.74) в полной его форме использовалось в работе для определения температуры поверхности частицы и преграды в зоне удара. При этом, принималось следующее допущение.

В виду малости длительности удара частицы о преграду (например, при  $V_p = 1000\text{ м/с}$ , время  $\tau_{yд} = 10^{-6}\text{ сек}$ ), среднемассовая температура прогретых за время удара участков частицы и преграды незначительна. Это значит, что температура материалов частицы и преграды не достигала температуры фазовых переходов, т.е. энергия, затраченная на фазовые переходы в нашем случае  $E_{ф.п.} = \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot h_{i,ф.п.} = 0$ . Кроме того, было принято, что температура в зоне удара  $T_{yд}$  равнялась

<sup>1</sup> Расчёт проведён для мономерного медного порошка с диаметром частиц  $d_{сш} = 20\text{ мкм}$ .

температуре частицы  $T_{w,p}$  и преграды  $T_{w, \text{прегр.}}$ , т.е.  $T_{y\delta} = T_{w,p} = T_{w, \text{прегр.}}$ , а также что  $T_{y\delta} \gg T_{нач.}$

В таком случае, соотношение (4.74) просто преобразуется к виду:

$$T_{y\delta} = \frac{0,5 \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot V_{p,i}^2 - \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \epsilon_{\text{эр.}} \cdot I_{\text{эр}} - \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \epsilon_{\text{дробл.}} \cdot Q_{\text{дробл. частиц}}}{\sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \bar{C}_P} \quad (4.76)$$

#### Выводы по главе 4

1. Проведён анализ термо-газодинамики течения сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока при натекании на плоскую преграду. Предложен алгоритм расчёта скорости частиц в сверхзвуковом полидисперсном гетерогенном потоке.

2. Разработан алгоритм расчета инерционного движения частиц сверхзвукового полидисперсного гетерогенного потока через ударную волну и сжатый слой.

3. Анализ полученных расчётных данных позволил установить возможные режимы взаимодействия сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока с плоской преградой в зависимости от размеров частиц «К-фазы» и их плотности.

4. Показано, что все частицы субмикронного диапазона не достигают поверхности преграды и сносятся вниз по потоку, то есть не взаимодействуют с поверхностью. Диаметр таких частиц обратно пропорционален плотности материала.

5. Получена зависимость (4.75) для расчёта скорости частиц разной дисперсности в гетерогенном потоке, вызывающих эрозию поверхности материала в момент удара о преграду.

6. Получена зависимость (4.76) для расчёта температуры в зоне контакта при ударе высокоскоростных частиц полидисперсного гетерогенного потока о преграду.

## **5. МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Под воздействием набегающего высокоскоростного гетерогенного потока, содержащего жидкие или твёрдые частицы, обтекаемая поверхность тела подвергается механическому эрозионному разрушению. С подобной проблемой приходится сталкиваться в разных областях техники. Например, при эксплуатации парогазовых турбин, несущих винтов вертолетов, элементов конструкции ЛА, подвергающихся воздействию высокотемпературной гетерогенной струи РДТТ. Особенно интенсивно подвергаются механической эрозии высокоскоростные летательные аппараты, преодолевающие атмосферные аномалии - дождевую и пылевую облачность.

Все эти вредные процессы должны быть устранены или сведены к минимуму. В этой связи механизм эрозионного разрушения конструкционных материалов должен быть тщательно изучен путём моделирования на лабораторных стендах с воспроизведением реальных условий воздействия.

На первом этапе значительная часть таких исследований была направлена на изучение процессов при единичном ударе высокоскоростной частицы о твёрдую поверхность, как наиболее простую форму взаимодействия. Подобные исследования проводились на баллистических стендах, поскольку на таких стендах можно максимально приближено к реальным условиям, реализовать физические процессы, сопутствующие единичному удару частицы о поверхность преграды (например, удар микрометеорита о поверхность КЛА). При этом интенсивность реализуемых при ударе физико-химических процессов определяется как скоростью в момент удара, так и массой и формой взаимодействующих тел.

Однако в реальных условиях полёта в атмосфере высокоскоростных ЛА при преодолении атмосферных гетерогенных аномалий механизм взаимодействия

гетерогенного потока с элементами конструкции аппарата значительно усложняется.

Исследование этого механизма, сочетающего комплекс физических, теплотехнических и даже химических процессов, также проводится на газодинамических стендах, воспроизводящих высокоскоростные гетерогенные потоки.

При реализации комплекса указанных процессов в ходе взаимодействия кинетическая энергия падающих частиц расходуется:

- на нагревание частицы и преграды при ударе;
- на кинетическую энергию осколков соударяющихся тел;
- на энергию эрозию поверхности конструкции;
- на энергию выброса массы в процессе эрозии.

Весь этот комплекс энергетических переходов определяет механизм механической эрозии поверхности конструкционных материалов, а, следовательно, и конструкции ЛА.

Вот почему сегодня остро стоит проблема изучения этих процессов, выявления их механизма с целью снижения до минимума механическую эрозию элементов конструкции высокоскоростных летательных аппаратов.

В последующих разделах работы проводится анализ исследований, выполненных как самим автором, так и заимствованных из опубликованных работ. При этом в работе анализ проведён для двух актуальных задач.

В первой из них проведён анализ особенностей эрозионного разрушения металлических конструкционных материалов, которые используются в конструкциях высокоскоростных ЛА.

Во второй задаче анализ посвящён особенностям эрозионного разрушения материалов теплозащитного назначения при взаимодействии с высокоскоростным гетерогенным потоком.

### **5.1. Анализ особенностей эрозионного разрушения металлических конструкционных материалов при взаимодействии с высокоскоростным гетерогенным потоком**

Исследования, проведённые в МАИ, а также в других организациях [2, 57, 74, 80 и др.] показали, что с повышением температуры металлических конструкционных материалов интенсивность их эрозионного разрушения увеличивается. При этом степень разрушения материалов определяется также родом материала.

В этой связи сочетание аэродинамического нагрева конструкции высокоскоростных ЛА с процессом взаимодействия с частицами гетерогенной атмосферы сопровождается интенсивным эрозионным уносом массы с поверхности конструкции, что недопустимо. Вот почему постановка в этом плане экспериментальных исследований становится задачей первостепенной важности.

При проведении экспериментальных исследований увеличение температуры образца из металлических конструкционных материалов наиболее просто можно осуществлять двумя методами: с использованием электрических омических нагревателей или газодинамического метода. Сущность газодинамического метода заключается в воздействии на поверхность образца нагретого гетерогенного потока с разной температурой газа-носителя. Последний метод использован при постановке экспериментальных исследований в данной работе.

В качестве примера влияние температуры исследуемого образца на безразмерную скорость эрозионного разрушения разного рода конструкционных материалов (углеродистых и легированных сталей, а также титанового сплава) представлено на рисунке 5.1.

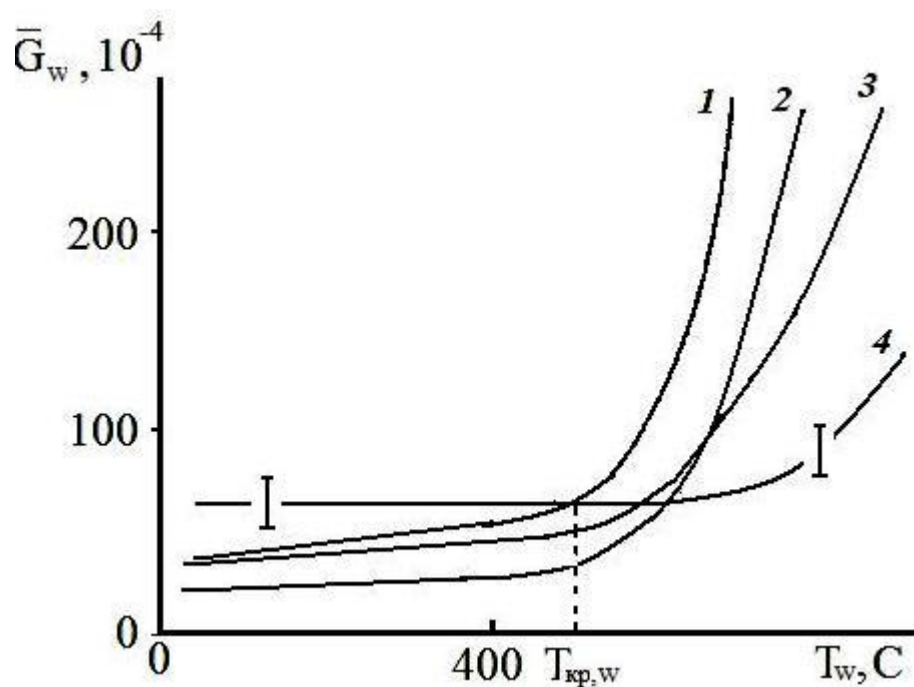
При этом понятие безразмерной скорости эрозионного разрушения конструкционных материалов определено соотношением вида:

$$\bar{G}_{w, \text{эп}} = \dot{m}_{\text{эп}} / \dot{m}_p = V_p^2 / 2I_{\text{эп}} \quad (5.1)$$

где  $\dot{m}_{эp}$  - удельная скорость эрозии материала в  $кг/(м^2 \cdot с)$ ,  $\dot{m}_p$  - удельный поток массы падающих на поверхность высокоскоростных частиц в  $кг/(м^2 \cdot с)$ ,  $V_p$  - скорость частиц,  $I_{эp}$  - энтальпия эрозии материала.

В эксперименте температура обрабатываемой поверхности подложки определялась с использованием тепловизора марки М-9200, работающего в инфракрасном спектре излучения. Кроме того, температура подложки контролировалась также термопарами хромель-капель.

Представленная на рисунке 5.1 безразмерная скорость разрушения материалов рассчитывалась по результатам проведенных экспериментов.



Частицы –  $SiO_2$  дисперсностью  $d_p = 5 \div 40$  мкм, угол атаки  $\alpha = 90^\circ$ , скорость частиц в момент удара  $V_p \sim 500$  м/с

1 – сталь Ст.3, 2 – сталь 45, 3 – сталь X18H9T, 4 – титановый сплав.

Рисунок 5.1. Зависимость безразмерной скорости эрозионного разрушения углеродистых и легированной сталей, а также титанового сплава от температуры подложки<sup>1</sup>

Из анализа полученных экспериментальных данных установлено наличие некоего критического значения температуры  $T_{кр}$  для каждого из исследованных материалов. При достижении температуры обрабатываемой поверхности критического значения при дальнейшем повышении температуры поверхности

<sup>1</sup> На рисунке линии – аппроксимация экспериментальных данных. Указана также погрешность эксперимента.

безразмерная скорость разрушения материала  $\bar{G}_w$  резко возрастает. Например, экспериментально установлено, что для каждого из указанных на рисунке исследованных материалов значение критической температуры заключалось в пределах  $T_{кр} \approx 800 \div 1200 \text{ K}$ .

Видно также, что при температуре обрабатываемой поверхности ниже  $T_{кр}$  интенсивность эрозионного разрушения материалов слабо увеличивается, а для некоторых материалов, например, титанового сплава в пределах относительной погрешности эксперимента ( $\pm 6\%$ ) даже не изменяется. Однако при температуре обрабатываемого материала, превышающей  $T_{кр}$ , наблюдается резкое увеличение интенсивности эрозионного разрушения.

По итогам анализа проведенных в данной работе и работах других авторов можно сделать важный вывод: на сегодняшний день, попытки обобщить результаты исследований эрозионного разрушения конструкционных металлических материалов и их сплавов от уровня температуры подложки, не дали положительных результатов. Это обусловлено прежде всего сложностью получаемой эмпирической зависимости, а также жёсткостью границ проведенных экспериментов.

Проанализированные выше данные экспериментальных исследований эрозионного разрушения под воздействием высокоскоростных гетерогенных потоков с «К-фазой» из окислов металлов и керамик, относятся в основном к металлическим материалам и их сплавам.

Анализ процесса эрозионного разрушения по результатам экспериментальных исследований ряда конструкционных материалов показал, что установленные критические значения, определяющие интенсивность эрозионного разрушения металлических материалов и сплавов, присущи не только для температуры материалов. Пороговые значения характерны и для других параметров, определяющих эрозионное разрушение материалов. К таким параметрам относятся:

-  $m_p$  - удельная масса «К-фазы» гетерогенного потока, падающая на обрабатываемую поверхность в единицу времени, т.е.  $\text{кг/сек}$ ;

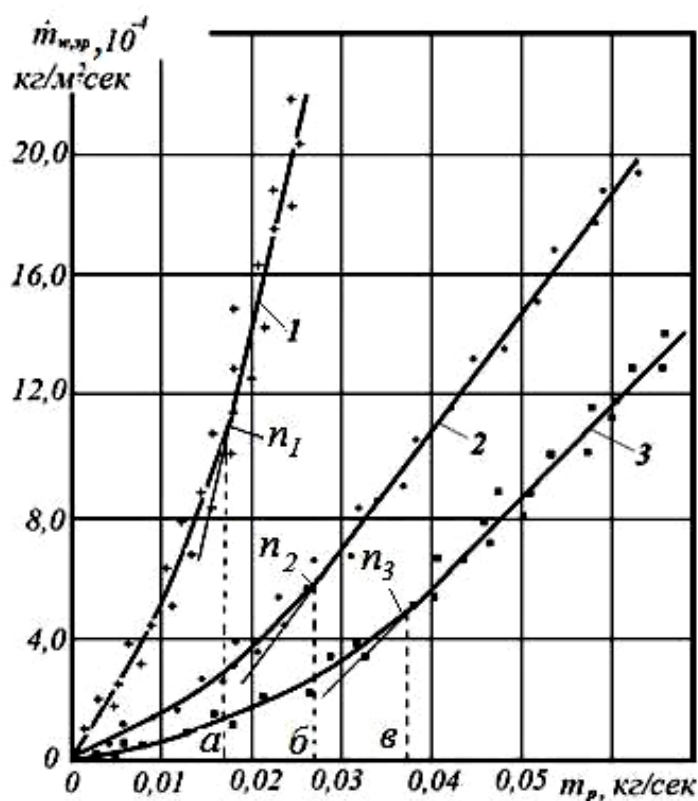
-  $V_p$  - скорость соударения частиц с поверхностью,  $\text{м/сек}$ .

В подтверждение указанного, ниже представлены данные экспериментальных исследований ряда конструкционных материалов.

Результаты получены на экспериментальных стендах МАИ. На стендах реализуются до - и сверхзвуковые гетерогенные потоки в широком диапазоне изменения параметров.

## 5.2. Развитие физического механизма эрозионного разрушения металлических конструкционных материалов и сплавов при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков

На рисунке 5.2 приведены экспериментальные данные эрозионного разрушения материалов при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков.



Частицы  $\text{SiO}_2$ . Дисперсность  $d_p = (5 \div 30)$  мкм. Скорость частиц  $V_p \approx 500$  м/с.

1 – алюминиевый сплав Д16, 2 – титановый сплав ВТ6, (состав 91% Ti, остальное – присадки: Fe, Al, Zr), 3 – X18Н10Т – легированная сталь.

$a, б, в$  – пороговые значения  $m_p$  для каждого материала.

$n_1, n_2, n_3$  – точки перегиба

Рисунок 5.2. Зависимость эрозионного разрушения  $\dot{m}_{эр}$  некоторых конструкционных материалов от интенсивности потока частиц  $m_p$



В результате анализа представленных на рисунке 5.1 и рисунке 5.2 экспериментальных данных, а также, обобщения результатов других авторов [2, 74] в данной работе составлен алгоритм развития физического механизма эрозионного разрушения материалов (металлов) в высокоскоростных гетерогенных потоках, то есть выявлен физический механизм эрозионного разрушения материалов. Схематически алгоритм развития физического механизма эрозионного разрушения материалов представлен на рисунке 5.3.

Сущность механизма выражается в том, что в процессе эрозионного разрушения металлических материалов явно проявляются две стадии (1 и 2 рисунок 5.3)<sup>2</sup>. Стадия 1 реализуется при низких значениях интенсивности потока частиц  $m_p$  ( $0 \leq m_p \leq m_{p,кр}$ ). На этой стадии функция  $\dot{m}_{w,эр} = f(m_p)$  является нелинейной. При увеличении  $m_p$  до уровня  $m_p \geq m_{p,кр}$  функция  $\dot{m}_{w,эр} = f(m_p)$ , становится линейной, то есть наступает стадия 2 эрозионного разрушения.

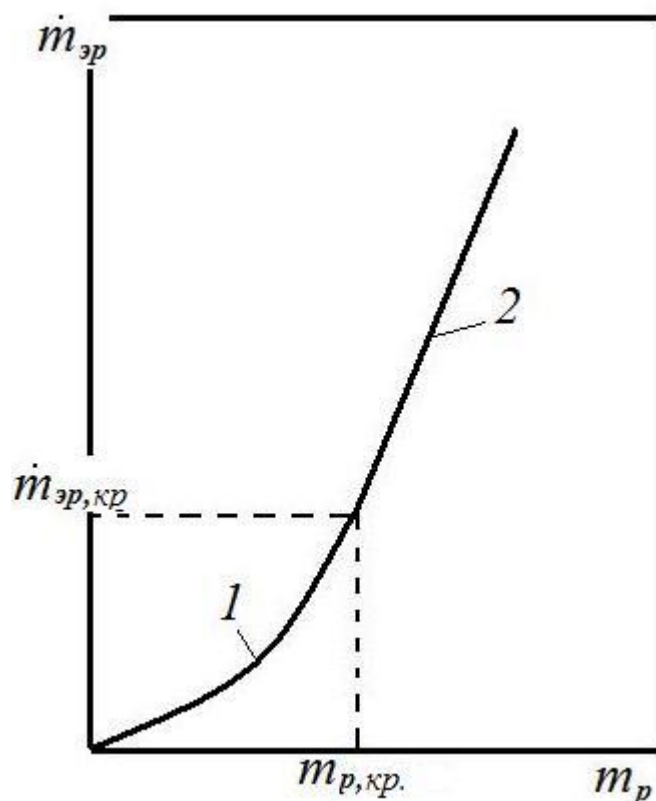


Рисунок 5.3. Схема механизма физического эрозионного разрушения металлов и сплавов при воздействии гетерогенным потоком с постоянной скоростью частиц ( $V_p = const$ )

<sup>2</sup> На рисунке 5.2 критические значения  $m_p$  обозначены  $a$ ,  $b$ ,

Проявление выявленных стадий механизма эрозионного разрушения металлов и их сплавов при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков можно проследить и на функциональной зависимости  $\bar{G}_{w,эп} = f(m_p)$ . Схема поведения указанной зависимости представлена на рисунке 5.4.

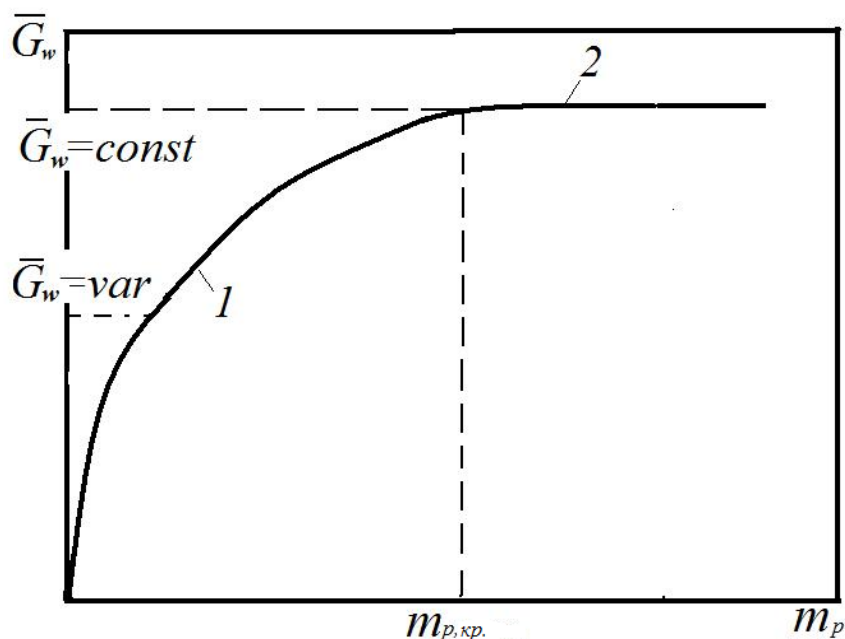


Рисунок 5.4. Качественная зависимость безразмерной скорости  $\bar{G}$  эрозионного разрушения материалов (металлов и сплавов) от интенсивности воздействия на поверхность удельной массы  $m_p$  частиц набегающего гетерогенного потока

Представленные на рисунках 5.3 и 5.4 схемы можно интерпретировать как механизм эрозионного разрушения конструкционных материалов (металлов и их сплавов).

Проведенный анализ многочисленных экспериментальных данных, в том числе, визуальное наблюдение хода эксперимента, а также исследование при многократном увеличении обработанной поверхности образцов конструкционных металлов гетерогенным потоком позволяет дать описание постадийного механизма их разрушения. Его интерпретация сводится к следующему:

- на первой стадии разрушения материалов реализуется предыстория развития механизма. На данной стадии поверхность материалов претерпевает ряд физических превращений, таких как: образование микротрещин, каверн, как следствия локальной эрозии поверхностного слоя. На этой же стадии

устанавливается температура поверхности материалов и температурное поле в их объёме. На реализацию данной стадии разрушения затрачивается некоторое время, которое будем называть временем реализации нестационарного механизма разрушения материалов. На этой стадии безразмерная скорость эрозионного разрушения  $\bar{G}_w$  нелинейно возрастает с увеличением интенсивности воздействия частиц гетерогенного потока  $m_p$  (рисунок 5.4);

- при завершении первой стадии развивается вторая стадия эрозионного разрушения. При этом зависимость  $\dot{m}_{w,эп} = f(m_p)$  становится линейной (рисунок 5.3), а  $\bar{G}_{w,эп} = f(m_p) = const$  (рисунок 5.4). Таким образом, наступает стационарная стадия механизма эрозионного разрушения металлических материалов.

Уровень интенсивности воздействия частиц гетерогенного потока  $m_p$  на поверхность обрабатываемого материала, при которой безразмерная скорость разрушения материалов  $\bar{G}_w$  становится постоянной, в дальнейшем будем называть критическим, то есть  $m_p = m_{p,кр}$ .

На этом режиме разрушения определим также значение скорости соударения частиц  $V_p$  с поверхностью преграды, как некое критическое значение, то есть  $V_p = V_{p,кр}$ . В данной работе расчётное соотношение для оценки величины  $V_{p,кр}$  получено в виде:

$$V_{эп,кр} = 1,41 \sqrt{I_{эп} \frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot \frac{\dot{m}_{p,кр}}{\dot{m}_{эп,кр}}}, \quad (5.2)$$

где  $\rho_m$  и  $\rho_p$  – плотности материалов преграды и частиц соответственно,  $I_{эп}$  – энтальпия эрозии материала. При этом использовано понятие  $I_{эп}$  в виде:

$$I_{эп} = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_{эп}} \cdot \frac{V_p^2}{2} \quad (5.3)$$

Проанализируем далее соотношение (5.2). В нём  $\dot{m}_{p,кр} = \rho_p \cdot V_{p,\Sigma,кр}$ , где  $\rho_p$  – плотность материала частиц, а  $V_{p,\Sigma,кр}$  – суммарный объём частиц ( $m^3/(m^2 \cdot сек)$ ), падающих на единицу поверхности в единицу времени. Аналогично,

$\dot{m}_{\text{эр,кр}} = \rho_m \cdot V_{\text{м,эр,кр}}$ , где  $\rho_m$  - плотность материала обрабатываемой поверхности,  $V_{\text{м,эр,кр}}$  - объём материала эрозировавшего с единицы поверхности в единицу времени ( $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ ). Поскольку при достижении частицами критической скорости  $V_{\text{р,кр}}$  параметр  $V_{\text{м,эр,кр}}$  не изменяется с увеличением  $V_{\text{р,Σ,кр}}$ , то соотношение (5.2) можно упростить до вида:

$$V_{\text{эр,кр}} = 1,41 \sqrt{I_{\text{эр}} \frac{\rho_m}{\rho_p}}, \quad (5.4)$$

Далее, используя соотношения (5.1) и (5.3), достаточно просто получить зависимость вида:

$$\bar{G}_w = \eta \cdot \frac{V_p^2}{2} / 2I_{\text{эр}}, \quad (5.5)$$

При этом введён коэффициент  $\eta$ , характеризующий долю кинетической энергии частицы, которая затрачена в процессе на разрушение (эрозию) материала (коэффициент аккомодации энергии при ударе частицы о преграду). Естественно, что коэффициент  $\eta$  зависит от скорости соударения частиц о преграду. Очевидно, при выполнении условия  $V_p = V_{\text{р,кр}}$ ,  $\eta = 1$ .

Экспериментально установлено (см. данные рисунка 5.1, а также данные работы [2]), что безразмерная скорость эрозионного разрушения большинства металлов и их сплавов изменяется незначительно до уровня температуры обрабатываемой поверхности, соответствующей значению  $T_w = T_{\text{w,кр}}$ . Ранее это значение температуры определено как критическое.

Анализ полученных экспериментальных данных настоящей работы, а также данных других исследователей показал, что с относительной погрешностью  $\pm 15\%$  значение критической температуры  $T_{\text{w,кр}}$  для конструкционных металлических материалов можно представить зависимостью:

$$T_{\text{w,кр}} \approx T_{\text{пл}}/2. \quad (5.6)$$

Далее, используем соотношение (5.5), полученное в результате проведенного выше анализа, а также экспериментальные данные, представленные

на рисунке 5.1, установим изменение  $I_{er}$  как функции  $T_w$  для некоторых конструкционных материалов.

Результаты изменения  $I_{er} = f(T_w)$  представлены на рисунке 5.5.

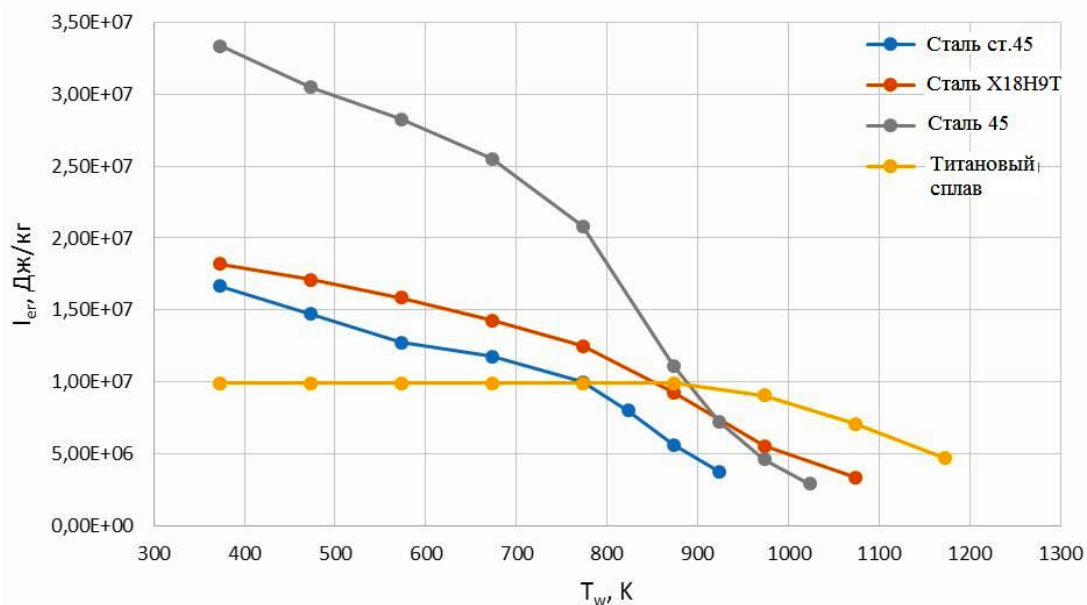
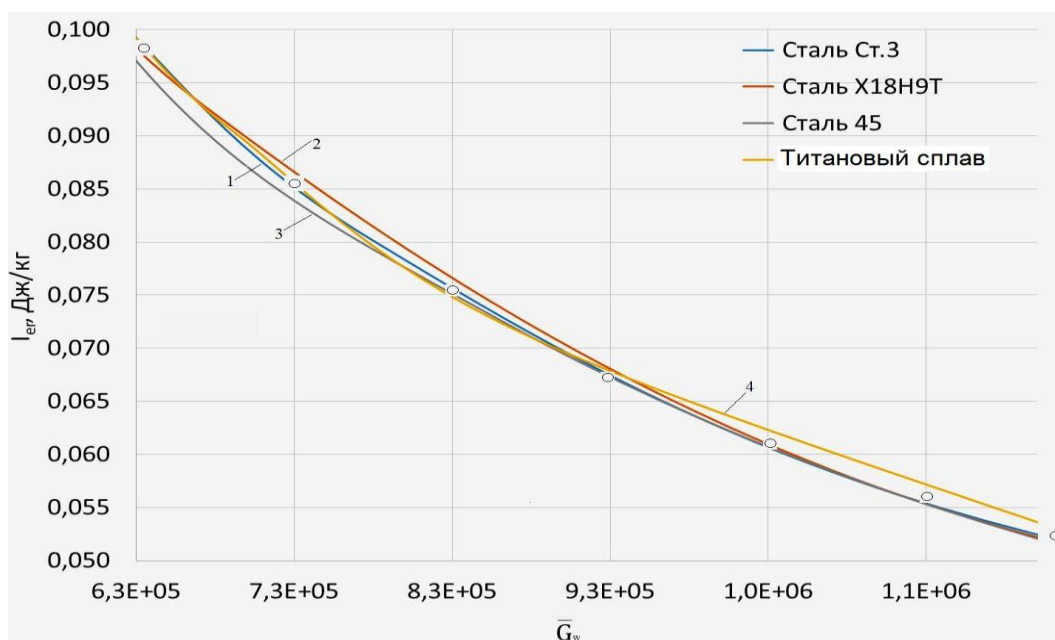


Рисунок 5.5. Зависимость эффективной энтальпии эрозии  $I_{эр}$  некоторых конструкционных металлических материалов от температуры поверхности  $T_w$

Из представленных на рисунке данных следует, что эффективная энтальпия эрозии  $I_{эр}$  конструкционных металлических материалов уменьшается с увеличением температуры поверхности  $T_w$ . Это объясняется тем, что при увеличении температуры металлические материалы уменьшают свою микротвёрдость, которая является определяющим параметром в процессе эрозии металлических материалов.



1- Ст.3, 2 – нержавеющая сталь X18Н9Т, 3 – Ст.45, 4 – титановый сплав.

Точки – расчёт по соотношению (5.5) при  $\eta=1$

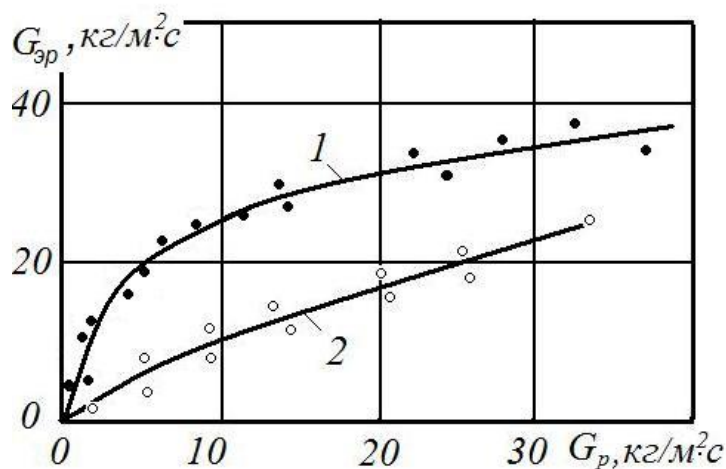
Рисунок 5.6. Зависимость эффективной энтальпии эрозии  $I_{ep}$  некоторых металлических конструкционных материалов от безразмерной скорости  $\bar{G}_w$

На рисунке 5.6 представлены экспериментальные данные (обобщение данных рисунка 5.1 и рисунка 5.5), обработанные с использованием соотношения (5.5) в виде зависимости  $I_{ep} = f(\bar{G}_w)$ . Видно, что для всех испытанных материалов функциональные зависимости  $I_{ep,i} = f(\bar{G}_{w,i})$  слабо отличаются друг от друга. В связи с этим можно сделать предварительный вывод, что функциональная зависимость  $I_{ep} = f(\bar{G}_w)$  для всех металлических конструкционных материалов может быть представлена в виде единой гиперболической функции, которая может быть использована при проектировании конструкций высокоскоростных ЛА из металлических материалов. При преобразовании соотношения (5.5), такая зависимость принимает вид:

$$I_{ep} = \eta \cdot \bar{G}_w^{-1} \cdot \frac{V_p^2}{4} \quad (5.7)$$

Иная картина эрозионного разрушения легированной стали обнаружена при воздействии на материал X18Н10Т высокотемпературного гетерогенного потока при больших уровнях давления торможения и высокой удельной плотности массы

$G_p$  падающих на поверхность частиц SiC дисперсностью (25÷40) мкм. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 5.7.



- 1 – сверхзвуковой гетерогенный поток с параметрами:  
 $P_0=5,0 \cdot 10^5$  Па,  $I_0=2500$  кДж/кг,  $V_p=1100$  м/с.  
 2 – сверхзвуковой гетерогенный поток с параметрами:  
 $P_0=3,0 \cdot 10^5$  Па,  $I_0=2000$  кДж/кг,  $V_p=900$  м/с.

Рисунок 5.7. Изменение удельной скорости эрозии  $G_{эп}$  стали X18H10T от удельной плотности массы  $G_p$  частиц SiC дисперсностью (25÷40) мкм, падающих на поверхность образца

Видно, что уменьшение давления торможения гетерогенного потока, а, следовательно, и снижение скорости газовой и твёрдой фаз существенно снижает скорость эрозии  $G_{эп}$  легированной стали при прочих равных условиях.

Кроме того, из полученных экспериментальных данных следует, что с увеличением удельного расхода подающих на единицу поверхности образца частиц твёрдой фазы, скорость эрозии  $G_{эп}$  также достигает некоторого критического значения. Его уровень определяется параметрами набегающего гетерогенного потока.

### 5.3. Анализ особенностей разрушения материалов теплозащитного назначения при взаимодействии с высокоскоростным гетерогенным потоком

Исследования показали, что основными физико-химическими процессами, определяющими механизм эрозионного разрушения теплозащитных материалов (ТЗМ), являются:

- процесс преобразования при ударе о поверхность кинетической энергии высокоскоростных частиц в теплоту;

- затраты выделившейся теплоты на процесс разрушения ТЗМ, то есть величина  $I_{эр}$ .

Кроме того, механизм эрозионного разрушения теплозащитных материалов в значительной степени определяется композиционным составом материалов и их теплофизическими свойствами, такими как: микротвёрдость, теплоёмкость, теплопроводность и др.

Например, обладая высокой микротвёрдостью материалы класса керамики, металлокерамики, пирографиты и др., при взаимодействии с высокоскоростными гетерогенным и потоками имеют совершенно другой механизм эрозионного разрушения по сравнению с материалами с низкой микротвёрдостью. Экспериментально установлено, что материалы с высокой микротвёрдостью (хрупкие материалы) имеют максимальную скорость эрозии при углах атаки «К-фазы»  $\alpha = 90^\circ$ , то есть когда частицы воздействуют по нормали к поверхности. Напротив, эрозионное разрушение материалов, обладающих низкой микротвёрдостью (вязкие материалы), сильно зависит от угла атаки частиц. Эти материалы имеют максимум интенсивности эрозионного разрушения при углах атаки  $\alpha = (15^\circ \div 30^\circ)$ . Такой механизм разрушения присущ в основном вязким металлам и их сплавам, а также композиционным ТЗМ с полимерными наполнителями (нагретые асбо-, стекло- и углепластики, разного рода пластмассы и др.).

В дальнейшем, анализ особенностей механизмов разрушения композиционных теплозащитных материалов (ТЗМ) при взаимодействии с высокоскоростным гетерогенным потоком будем проводить по результатам исследований, в основном экспериментальных, двух типов широко используемых в настоящее время в высокоскоростной авиации и РКТ материалов, таких как:

- стеклопластик ТЗМКТ-8;
- углерод-углеродный композиционный материал – УУКМ-1.



При этом стеклопластик ТЗМКТ-8 относится к классу композиционных ТЗМ на основе кварцевой ткани и эпоксидной смолы. В то время как УУКМ-1 представляет класс углеродных ТЗМ. Уникальность этого материала выражается в том, что он повышает свои механические свойства с увеличением температуры.

При выполнении данной работы алгоритм экспериментальных исследований указанных типов материалов сводился к следующему. Исследования теплозащитных характеристик указанных материалов проводились на стендах в широком диапазоне термо-газодинамических и тепловых характеристик набегающего высокоскоростного гетерогенного потока. Спектр таких характеристик составляет: дисперсность частиц в потоке («К-фазы»)  $d_p$  (м), скорость частиц в момент удара о поверхность исследуемого образца  $V_p$  (м/сек), удельный расход массы частиц «К-фазы»  $\dot{m}_p$  (кг/м<sup>2</sup>·с), падающей на единицу поверхности исследуемой модели, давление торможения  $P_0$  (Па), энтальпия торможения  $I_0$  (Дж/кг), удельная суммарная скорость разрушения материалов при воздействии высокоскоростного высокотемпературного гетерогенного потока  $\dot{G}_\Sigma$  (кг/м<sup>2</sup>·с), удельная массовая скорость эрозионного разрушения  $\dot{m}_{эп}$  (кг/м<sup>2</sup>·с), удельная массовая скорость термохимического разрушения  $\dot{m}_{w,гом}$  (кг/м<sup>2</sup>·с), безразмерная скорость эрозионного разрушения  $\bar{G}_{w,эп}$ , эффективная энтальпия эрозионного разрушения  $I_{эп}$  (Дж/кг), температура поверхности  $T_w$ . При этом выполняется соотношение:

$$\dot{G}_\Sigma = \dot{m}_{эп} + \dot{m}_{w,гом} \quad (5.8)$$

Такое обилие характеристик обусловлено действием на исследуемый материал разных факторов. Последнее затрудняет обобщение экспериментальных данных и вызывает особые трудности при составлении математических моделей процессов, а также методов их численного решения. В силу указанного обстоятельства в данной работе исследование механизмов разрушения ТЗМ проводилось путём анализа экспериментальных данных. По этой же причине в работе не проведены обобщения экспериментов в виде эмпирических

соотношений с использованием разнообразных поправочных коэффициентов. Кстати, большой спектр параметров, определяющих механизм взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с конструкционными и теплозащитными материалами, очевидно, обуславливает незначительное количество опубликованных работ, посвященных исследованию этой проблемы. В качестве примера, указывающего на трудность обобщения экспериментальных данных можно привести результаты исследований, представленные в монографии [2]. В работе систематизирована некоторая подборка данных. В результате рекомендовано весьма сложное эмпирическое соотношение (5.9) в виде:

$$\bar{G}_{эп} = k_1 \left( \frac{V_p}{10^4} \right)^a \left( \frac{T_w}{530} \right)^b \left[ 1 + \frac{k_2}{k_1 m_p \left( \frac{V_p}{10^4} \right)^a \left( \frac{T_w}{530} \right)^b \sin \alpha^d} \right]^c \sin \alpha^d \quad (5.9)$$

Значения коэффициентов и степеней, используемые в эмпирической зависимости, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Наименование материала	Значения коэффициентов и степеней в соотношении (5,9)					
	$k_1$	$k_2$	$a$	$b$	$c$	$d$
Графит В-1.	28,0	0	2,00	0,2	0	1,25
Углерод-углерод	10,1	$9,25 \cdot 10^{-4}$	1,82	0,2	0,33	1,25

Соотношение (5.9) представлено в виде зависимости величины безразмерной скорости эрозионного разрушения  $\bar{G}_{эп}$  графита и углерод-углеродного композиционного материала от температуры поверхности  $T_w$  и других параметров ( $V_p$  – скорости частиц в момент удара о поверхность,  $\alpha$  – угол атаки частиц при ударе о поверхность и др.). При этом с целью повышения точности совпадения экспериментальных данных с расчётными данными по предложенной зависимости авторы ввели поправочные коэффициенты, значения которых приведены в приложенной к графику таблице 4.1.

Как видно, сложность представленной зависимости определяется рядом факторов. Например, основным недостатком соотношения (5.9) является ограниченность её применения, поскольку формула получена в результате обобщения экспериментальных данных, которые, как известно, имеют узкие диапазоны изменения параметров набегающего гетерогенного потока. Это обусловлено тем, что экспериментальные исследования взаимодействия конструкционных и теплозащитных материалов (ТЗМ) с высокоскоростными гетерогенными потоками, как правило, проводятся на высоко- и низкотемпературных газодинамических стендах, которые воспроизводят достаточно узкий диапазон изменения параметров набегающего гетерогенного потока.

В связи с указанным, в данной работе проведён только анализ особенностей механизмов разрушения некоторых композиционных ТЗМ при воздействии на них высокоскоростных высокотемпературных гетерогенных потоков разной интенсивности. В анализе использованы экспериментальные данные как настоящей работы, так и данные других исследователей.

### ***5.3.1. Особенности разрушения стеклопластиков при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков***

Стеклопластики по составу содержат, как правило, два компонента – связующее и наполнитель. Наиболее оптимальное сочетание этих композиций составляет: ~ 30% связующего - смолы и ~ 70% наполнителя - основы. Наполнитель представляет собой плетёный каркас (рогожку), как правило, из кварцевой стеклоткани. Связующее - органическая полимерная смола.

Стеклопластические ТЗМ нашли широкое применение в авиационной и ракетно-космической технике. В этой связи изучение их механизма разрушения в высокотемпературных гомогенных и особенно гетерогенных потоках является одной из актуальных задач науки и техники.

В данной работе исследование особенностей механизма разрушения стеклопластиков при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков

проведено на примере анализа экспериментальных данных стеклопластика ТЗМКТ-8 – типичного представителя стеклопластиков, используемых в качестве ТЗМ на изделиях авиационной и ракетной техники.

В работе экспериментальные данные получены на высокотемпературных сверхзвуковых стендах МАИ, генерирующих как гомогенные, так и гетерогенные потоки.

Следует отметить, что характеристики разрушения стеклопластиков, как и других ТЗМ сильно зависят от методики постановки исследований.

Например, на рисунке 5.8 представлены образцы стеклопластика ТЗМКТ-8 после испытания в условиях воздействия гетерогенного (*а*) и гомогенного (*б*) высокотемпературных сверхзвуковых потоков (газ-носитель воздух).

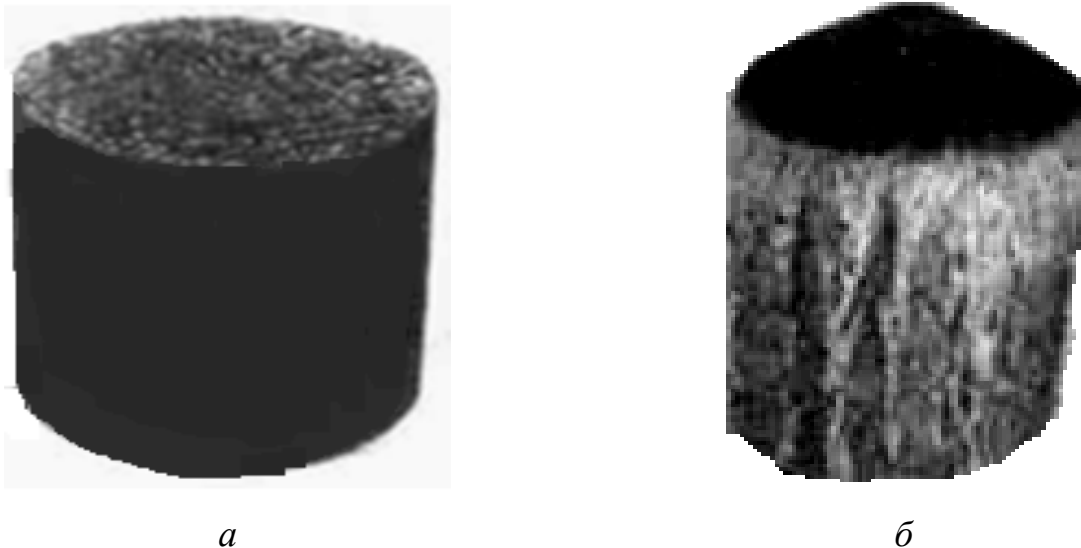
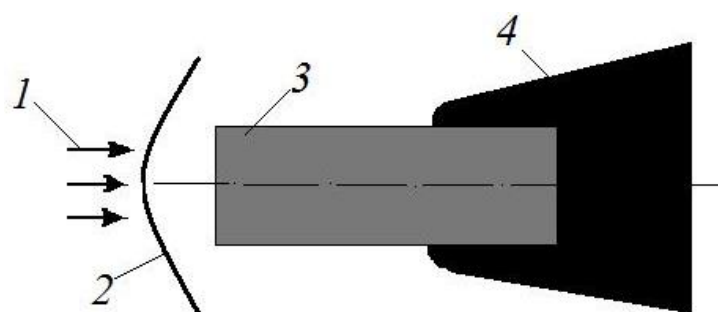


Рисунок 5.8. Форма образцов стеклопластика при испытании в интенсивном гетерогенным *а* и гомогенным *б* сверхзвуковых высокотемпературных потоках (данные заимствованы из работы [2])

В работе [2] методика испытания образцов ТЗМ в гетерогенном и гомогенном сверхзвуковом высокотемпературном потоке проводилась по схеме, представленной на рисунке 5.9. Сущность методики заключалась в следующем.



1 – набегающий сверхзвуковой гетерогенный или гомогенный поток, ударная волна, 3 – исследуемый образец, 4 – державка

Рисунок 5.9. Методика испытания образца в гетерогенном и гомогенном потоке

Перед испытаниями исследуемый образец 3 диаметром 40 мм устанавливался в державке 4 в виде консоли, выступающей из державки. Испытания образцов проводились в сверхзвуковом потоке газогенератора. При этом параметры набегающего гомогенного потока составляли: давление торможения  $P_0 = 8,0 \text{ МПа}$ , температура торможения  $T_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ К}$ . Параметры набегающего высокотемпературного гетерогенного сверхзвукового потока составляли: давление торможения  $P_0 = 8,0 \text{ МПа}$ , температура торможения  $T_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ К}$ , скорость частиц  $\text{SiO}_2$  диаметром  $d_p = 50 \text{ мкм}$  в момент удара о поверхность образца равнялась  $V_p = \sim 1000 \text{ м/сек}$ . Интенсивность потока «К-фазы», подающего на исследуемый образец, составляла  $G_p = 30 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ . При указанных параметрах в ходе эксперимента образец подвергался эрозионному (в сверхзвуковом высокотемпературном гетерогенном потоке - 1) или термохимическому (в гомогенном сверхзвуковом высокотемпературном потоке - 1) разрушению как с торцевой, так и с боковой поверхности. Такая методическая постановка эксперимента исследования ТЗМ не соответствует реальным условиям эксплуатации ЛА, в которых материал конструкции ЛА, в том числе и тепловой защиты, подвергается воздействию указанными потоками непосредственно с поверхности.

В этой связи на рисунке 5.7 формы образцов имеют заметное отличие. Прежде всего, это отличие сильно проявляется в размерах диаметров образцов ( $d_a > d_b$ ). Кроме того, совершенно различаются формы торцевых поверхностей образцов а и б.

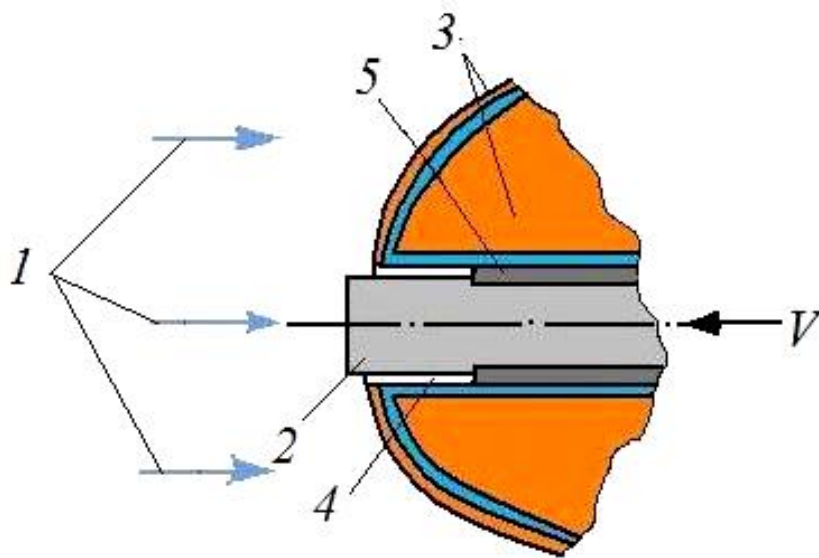
Различие диаметров образцов обусловлено тем, что при огневом испытании образца в гомогенном потоке, его термохимическое и механическое разрушение осуществлялось как с торцевой, так и с боковой поверхностей. В подтверждении этого на боковой поверхности образца  $b$  видны твёрдые участки расплавленного  $SiO_2$ . Это указывает на тот факт, что на боковой поверхности образца реализовалась термохимическая деструкция наполнителя (эпоксидной смолы), а также фазовые переходы кварцевой ткани (связующего) стеклопластика. Эти процессы вызывали уменьшение диаметр исследуемого образца.

При испытании образца в гетерогенном потоке в связи с чрезмерно высокой интенсивностью потока «К-фазы», воздействующей на поверхность ( $G_p = 30 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ ) [2], линейная эрозионная скорость перемещения торцевой поверхности была столь велика, что поверхность образца не достигала температуры разрушения (как это было в случае воздействия высокотемпературного гомогенного потока), а разрушалась практически в холодном состоянии. Это, очевидно, обеспечивало равномерный унос массы образца по всей его торцевой поверхности. В результате торцевая поверхность образца оставалась плоской в ходе всего эксперимента. Можно предположить, что эрозионный унос массы образца с боковой поверхности практически отсутствовал. Это обусловлено тем, что поток массы образца с торцевой поверхности, вызванный процессом эрозии, был столь интенсивен, что он противодействовал проникновению частиц набегающего потока к боковой поверхности, что исключало эрозионное разрушение боковой поверхности образца.

Отличие формы торцевой поверхности образцов при их испытании гетерогенном и гомогенном потоках, очевидно, обусловлено также методикой постановки эксперимента. При указанном высоком уровне давления торможения в гомогенном потоке на торцевой поверхности образца реализовался чрезмерно большой градиент скорости. В таком случае, на торцевой поверхности образца, согласно закону Ньютона, создавались высокие уровни поверхностных касательных напряжений. Последние в свою очередь способствовали

интенсивному механическому разрушению периферии торцевой поверхности образца, что создавало конусность на обрабатываемой торцевой поверхности (рисунок 5.8 б).

При проведении исследований характеристик материалов на стендах МАИ, методика постановки эксперимента существенно отличается от методики работы [10]. В МАИ для исследования характеристик ТЗМ в эксперименте использовалась охлаждаемая сферическая модель, схема которой представлена на рисунке 5.10.



1 - высокотемпературные гомогенные или гетерогенные потоки за скачком уплотнения, 2 – исследуемый образец, 3 – охлаждаемая модель, 4 – воздушный зазор, 5 - втулка из теплоизоляционного материала, V- скорость подачи образца по мере его линейного уноса

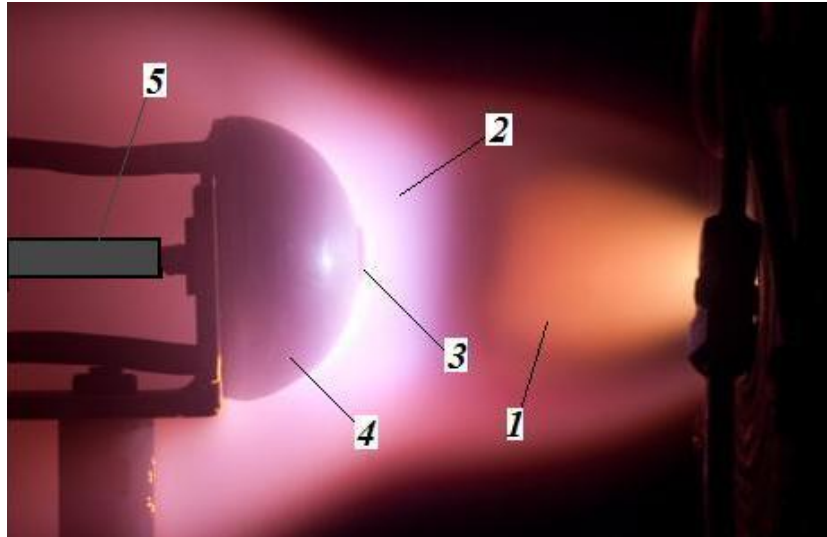
Рисунок 5.10. Схема испытания образцов ТЗМ в сверхзвуковых высокотемпературных гомогенных и гетерогенных потоках

Главная особенность разработанной модели выражалась в том, что:

- во-первых, предложенная конструкция модели обеспечивала одномерный прогрев исследуемого образца. Это обусловлено тем, что сток теплоты с боковой поверхности образца сводится к минимуму за счёт того, что треть его длины защищена втулкой 5 из теплоизолятора. Остальная передняя часть образца отделена от охлаждаемой поверхности модели воздушным зазором 4 толщиной 0,5 мм;

- во-вторых, образец по мере разрушения подавался оператором в исходное сечение набегающего потока со скоростью, соответствующей линейной скорости уноса. Это обеспечивало постоянство параметров набегающего потока, воздействующего на исследуемый образец.

Вид исследуемой модели в ходе эксперимента представлен на рисунок 5.11.



*1 – сверхзвуковой поток, 2 – ударная волна и сжатый слой, 3 – исследуемый образец, 4 – охлаждаемая державка (см. рисунок 5.10), 5 – механизм подачи образца по мере его разрушения*

Рисунок 5.11. Вид модели с исследуемым образцом при обтекании сверхзвуковым высокотемпературным гомогенным потоком

Вид торца образца стеклопластика ТЗМКТ-8 после испытания на стенде МАИ по описанной выше методике в сверхзвуковом высокотемпературном гомогенном потоке представлена на рисунке 5.12.

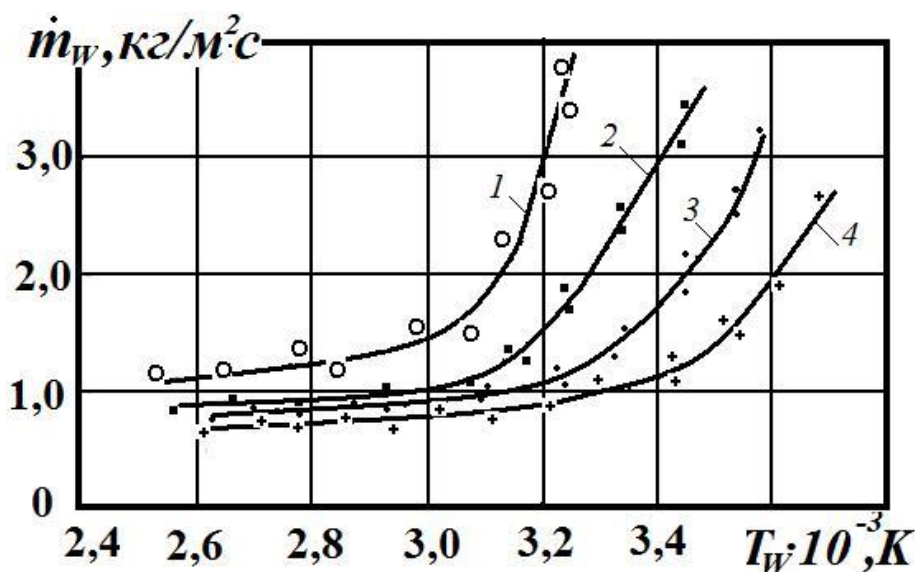




Энтальпия торможения -  $I_0 = 2,0 \cdot 10^4$  кДж/кг, давление торможения -  
 $P_0 = 1,5 \cdot 10^5$  Па

Рисунок 5.12. Общий вид торца образца ТЗМКТ-8 при испытании в высокотемпературном гомогенном потоке в течение  $\tau = 80$  сек

Видно, что при указанных параметрах набегающего потока на обрабатываемой поверхности (торце) образца образуется рваная плёнка расплава кварца  $\text{SiO}_2$ . Это указывает на то, что образец подвергался не только эрозионному, но и термохимическому разрушению.



1 -  $P_0 = 2 \cdot 10^4$ , Па; 2 -  $P_0 = 10^5$ , Па; 3 -  $P_0 = 5 \cdot 10^5$ , Па; 4 -  $P_0 = 10^6$ , Па.  
 $q_0 = 2 \cdot 10^3$  кВт/м<sup>2</sup> ÷  $10^5$ , кВт/м<sup>2</sup>

Рисунок 5.13. Изменение скорости уноса массы стеклопластика ТЗМКТ-8 от температуры поверхности при воздействии высокотемпературным гомогенным воздушным потоком при разных уровнях давления [57]

Результаты исследования скорости уноса массы стеклопластика  $\dot{m}_w = f(T_w)$  высокотемпературного гомогенного потока при вариации давления торможения  $P_0$  приведены на рисунке 5.13. Видно, что в указанном диапазоне изменения  $T_w$  механизм разрушения стеклопластика в высокотемпературном потоке воздуха имеет две стадии: термохимическое и сублимационное разрушения.

Иная картина механизма разрушения стеклопластика ТЗМКТ-8 наблюдается при воздействии на образец высокотемпературным сверхзвуковым гетерогенным потоком.

В таких условиях воздействия механизм разрушения материала определяется как скоростью и температурой «К-фазы», так и удельной плотностью частиц, достигающих поверхности образца. В качестве примера на рисунке 5.14 проведено фото торца образца после воздействия высокотемпературным гетерогенным полидисперсным потоком.



Параметры набегающего потока составляли: частицы из  $SiC$ , дисперсность частиц  $5 \leq d_{\text{част}} \leq 20 \text{ мкм}$ , массовая концентрация частиц в гетерогенном потоке  $C_p \leq 10\%$ , скорость частиц по данным лазерной доплеровской анемометрии изменялась в зависимости от их диаметра в диапазоне  $400 \leq V_p \leq 700 \text{ м/с}$ , энтальпия торможения газа-носителя  $I_0 = 5 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$ , давление торможения  $P_0 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

Рисунок 5.15. Торце образца стеклопластика после воздействия высокотемпературным гетерогенным полидисперсным потоком

При этом поскольку плотность частиц, вызывающих эрозию материала, была умеренной (10% по массе), то энергия бомбардирующих поверхность материала затрачивалась только на процесс эрозии. В этой связи расплавленный на поверхности образца  $SiO_2$  конденсировался в виде капель на охлаждаемой поверхности модели.

Видно, что при указанных параметрах воздействия набегающего гетерогенного потока механизм разрушения торца образца стеклопластика существенно отличается от ранее описанного механизма при более интенсивных

параметрах потока. Из представленной на рисунке 5.15 картины следует, что эрозионный унос торца образца подвергается одновременно как эрозионному, так и термохимическому разрушению.

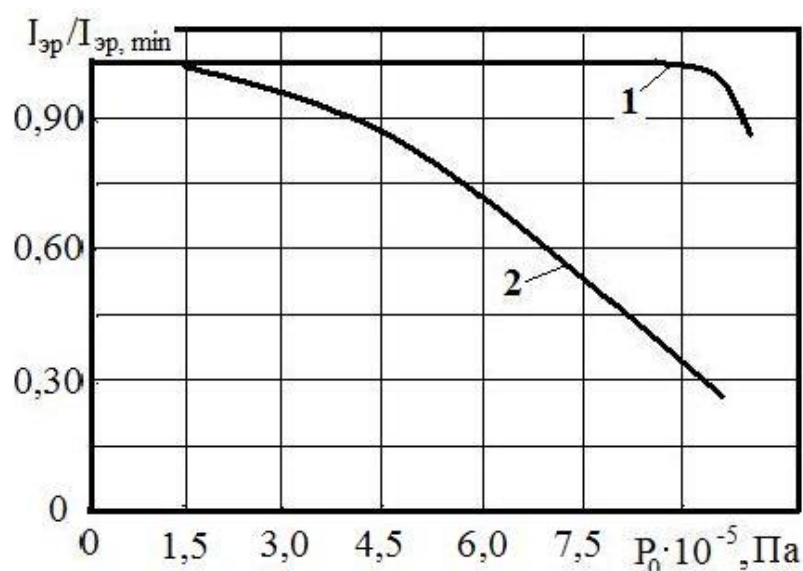


Скорость частиц в набегающем потоке  $V_{\text{час}} = \sim 907 \text{ м/с}$ , энтальпия торможения  $I_0 = 5 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$ , давление торможения гетерогенного потока  $P_0 = \sim 7.4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , массовая концентрация частиц «К-фазы» составила 20%.

Рисунок 5.16. Вид поверхности торца образца стеклопластика ТЗМКТ-8 после воздействия высокотемпературным сверхзвуковым гетерогенным потоком с повышенными параметрами

Необходимо отметить, что обрабатываемая гетерогенным потоком торцевая поверхность образца стеклопластика достаточно равномерная и не содержит зон расплавленного кварца ( $\text{SiO}_2$ ). На поверхности отсутствуют также аномальные выступы или впадины. Это указывает на тот факт, что определяющим процессом в механизме разрушения материала при указанных параметрах набегающего потока является эрозионный унос, обусловленный воздействием твёрдой фазы (частиц) на материал.

На рисунке 5.17 представлены обработанные данные эксперимента, полученные при исследовании стеклопластика ТЗМКТ-8 при воздействии высокоскоростного гетерогенного потока с указанными выше параметрами.



$I_{\text{эп, min}}$  – эрозия материала при  $P_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

1-  $d_p = 10 \div 15 \text{ мкм}$ , температура поверхности  $T_w = 1400 \text{ К}$ , 2 -  $d_p = 45 \div 50 \text{ мкм}$ , температура поверхности  $T_w = 1200 \text{ К}$ .

Содержание «К-фазы» в гетерогенных потоках 20%.

Рисунок 5.17. Изменение эффективной энтальпии эрозии  $I_{\text{эп}}$  стеклопластика ТЗМКТ- 8 при воздействии сверхзвукового гетерогенного потока с разными уровнями давления торможения  $P_0 = \text{var}$  и дисперсностью частиц  $d_p = 10 \div 15 \text{ мкм}$  и  $d_p = 45 \div 50 \text{ мкм}$ <sup>3</sup>

Видно, что давление торможения  $P_0$ , а следовательно, скорость частиц  $V_p$  в потоке, а также их дисперсность сильно влияют на процесс эрозии стеклопластика. Например, в указанном диапазоне изменения давления торможения  $P_0$  при воздействии высокоскоростных частиц с дисперсностью  $d_p = 45 \div 50 \text{ мкм}$  эффективная энтальпия эрозии  $I_{\text{эп}}$  сильно уменьшается с увеличением давления торможения набегающего потока.

Для анализа установленного факта обратимся к соотношению, определяющему понятие эффективной энтальпии эрозии материала. Имеем:

$$I_{\text{эп}} = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_{\text{эп}}} \cdot \frac{V_p^2}{2} \quad (5.10)$$

Согласно (5.10) эффективная энтальпия эрозии материала  $I_{\text{эп}}$  при прочих равных условиях будет уменьшаться с увеличением скорости эрозионного уноса массы материала  $\dot{m}_{\text{эп}}$ . В свою очередь  $\dot{m}_{\text{эп}}$  является функцией скорости частиц в

<sup>3</sup> Гетерогенный поток воздействовал по нормали к поверхности.

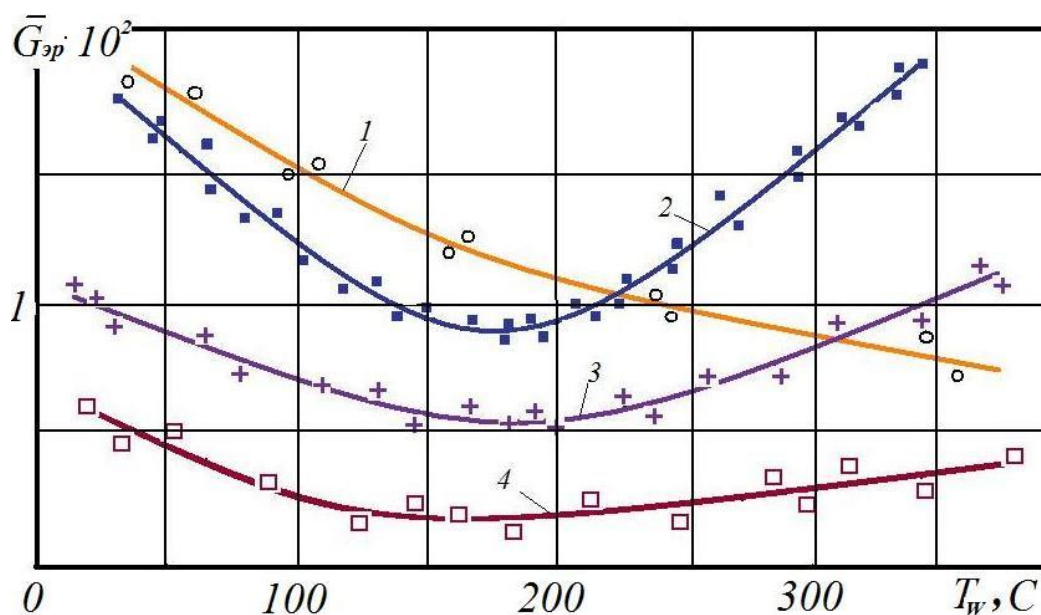
момент удара, а также удельной плотности потока частиц  $\dot{m}_p$ , падающих на единицу обрабатываемой поверхности исследуемого образца. В эксперименте, поставленном в данной работе,  $\dot{m}_p$  не изменяется.

Таким образом, уменьшение  $I_{эп}$  стеклопластика в случае увеличения дисперсности частиц, очевидно, обусловлено тем, что частицы с большей дисперсией преодолевают сжатый и пограничный слои без потерь скорости. В результате в момент удара о поверхность образца частицы с большей дисперсностью интенсифицируют процесс эрозии материала, что снижает уровень  $I_{эп}$ . В подтверждение указанному свидетельствует тот факт, что при увеличении  $P_0$  до уровня  $\sim 8 \cdot 10^5$  Па отношение  $I_{эп}/I_{эп.min}$  уменьшается, что, очевидно, связано с тем, что при повышенных значениях  $P_0$  скорость частиц меньшей дисперсности сильно возрастает. Последнее вызывает интенсификацию эрозии материала (увеличение  $\dot{m}_{эп}$ ), а, следовательно, и уменьшение  $I_{эп}/I_{эп.min}$  (см. рисунок 5.17, кривая 1).

На рисунке 5.18 приведены результаты экспериментальных исследований влияния относительно низких значений температуры поверхности исследуемых образцов некоторых композиционных ТЗМ на их эрозионное разрушение. Такие исследования обусловлены тем, что при разработке высокоскоростных ЛА, возникала задача использования в элементах конструкций ЛА разных композиционных ТЗМ. В этом плане потребовались параметры эрозионного разрушения ТЗМ, созданных на базе связующих - разных по природе сорта тканей (рогожек) и наполнителей (различных полимерных смол).

Экспериментальные исследования проводились на газодинамических стендах МАИ, генерирующих гетерогенные потоки с широким диапазоном скоростей частиц. Дисперсность частиц составляла  $10 \leq d_p \leq 50$  мкм. На стендах скорость частиц изменялась в широком диапазоне,  $V_p = 300 \div 1200$  м/сек. Скорость частиц измерялась с использованием автоматизированного лазерного доплеровского измерителя скорости. В процессе эксперимента поверхность

исследуемых образцов нагревались набегающим потоком до температур  $T_w = 300 \div 1500 \text{ K}$ .



«К-фаза»: частицы  $\text{SiC}$ , угол атаки частиц  $\alpha=90^\circ$ , дисперсность  $d_p=(20\div 50)$  мкм, скорость частиц в потоке  $V_p=(350\div 500)$  м/с, массовая концентрация частиц  $\text{SiC}$  в потоке  $(10\div 15)\%$ .  
1 – ТЗМКТ-8, 2 – СТКТ-П, 3 – асбобластик АТ-1В, 4 – термопластик ТП-41.

Рисунок 5.18. Влияние температуры поверхности образца на интенсивность эрозионного разрушения разных композиционных ТЗМ при воздействии гетерогенного потока

Из анализа представленных на рисунке 5.18 данных следует, что, при указанной скорости частиц в потоке, все исследованные композиционные ТЗМ имели неоднозначные уровни безразмерной скорости эрозии. Некоторые ТЗМ, например, обозначенные цифрами 2, 3 и 4 имеют явно выраженный минимум. Это объясняется тем, что, как известно, связующие (органические столы) композиционных ТЗМ при температурах  $\sim 500\text{K}$  подвергается размягчению, а затем при температурах  $\sim 600\text{ K}$  деполимеризуются. В результате при соударении с вязкой смолой высокоскоростные частицы тормозятся в ней. Это сводит к минимуму эрозию смолы, а, следовательно, и к минимуму безразмерной скорости уноса массы смолы  $\bar{G}_{эр}$  (см. позиции 2, 3, 4 рисунка 5.18).

Следует отметить, что связующим стеклопластика ТЗМКТ-8 является эпоксидная смола, температура размягчения которой близка к  $600\text{K}$ , что,

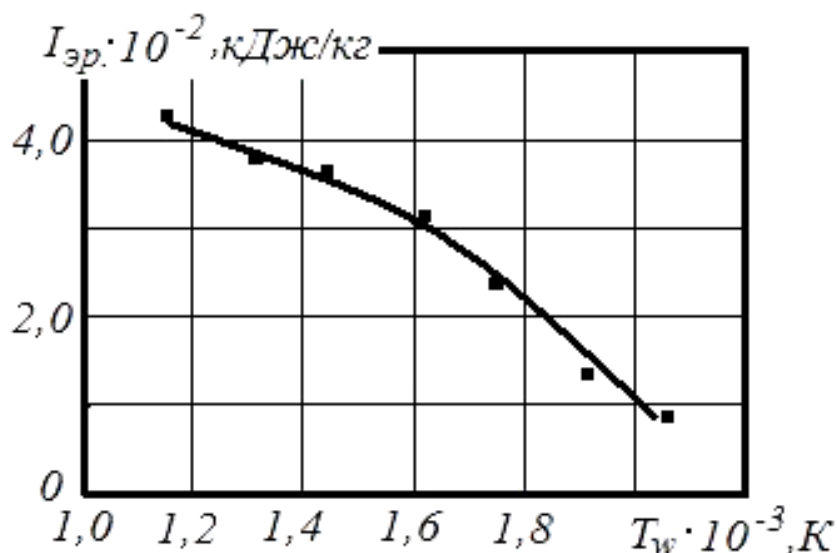
очевидно, сдвигает минимум зависимости  $\bar{G}_{эр} = f(T_w)$  в область более высоких температур (см. рисунок 5.18, кр.1).

Иная картина наблюдается при воздействии сверхзвуковых высокотемпературных гетерогенных потоков на стеклопластические композиционные материалы при более высоких температурах поверхности ( $T_w \geq 1000 \text{ K}$ ). При таком уровне температур поверхности эрозионная скорость разрушения материалов снижается. Причиной этого процесса являются два фактора. Первый из них выражается в том, что продукты эрозионного разрушения (частицы, удалённые с поверхности) образуют непосредственно перед исследуемым образцом достаточно плотное облако. Это облако, взаимодействуя с частицами набегающего потока, уменьшают их кинетическую энергию, что снижает процесс эрозии материала.

Второй фактор снижает эрозионную скорость разрушения стеклопластика вследствие образования на поверхности образца довольно прочного коксового остатка, состоящего в основном из карбида кремния. Как известно, SiC обладает высокой микротвёрдостью.

Эксперименты показали, что интенсивность разрушения такого коксового остатка определяется как дисперсностью частиц, так и скоростью их взаимодействия с поверхностью.

Изложенная концепция подтверждается экспериментальными данными, представленными на рисунке 5.19.



Частицы - SiC, угол атаки частиц  $\alpha=90^\circ$ , дисперсность  $d_p=(20\div 50)$  мкм, скорость частиц в потоке  $V_p \approx 900$  м/с, массовая концентрация частиц SiC в потоке (10÷15) %

Рисунок 5.19. Изменения энтальпии эрозии стеклопластика ТЗМКТ-8 от температуры поверхности материала и скорости удара частиц о поверхность образца

На рисунке 5.20 представлены для сравнения данные энтальпии термохимического разрушения стеклопластика ТЗМКТ-8 в высокотемпературном сверхзвуковом потоке воздуха.

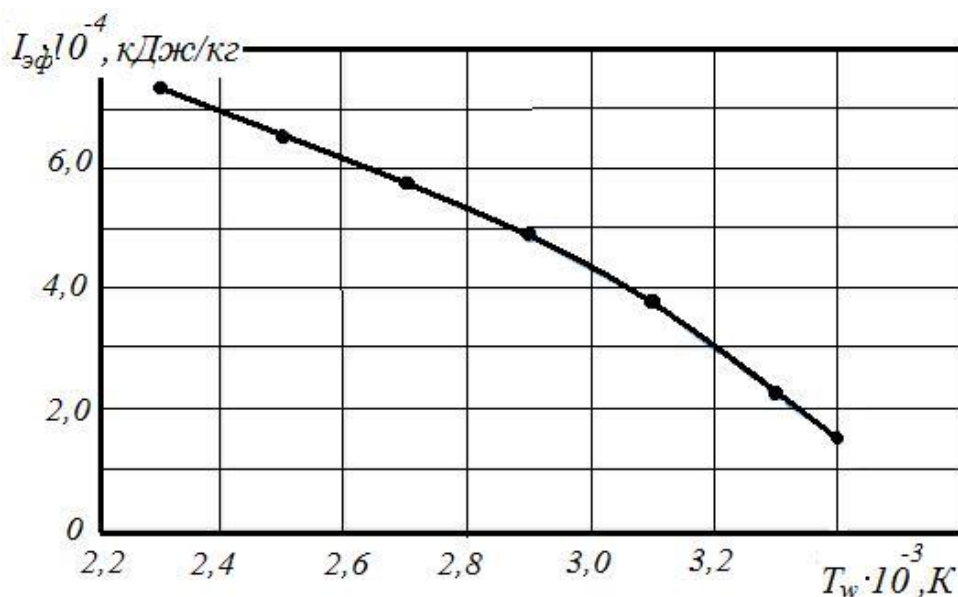


Рисунок 5.20. Изменения энтальпии термохимического разрушения стеклопластика ТЗМКТ-8 в условиях воздействия гомогенного сверхзвукового высокотемпературного потока воздуха

Видно, что при прочих равных тепловых параметрах набегающих потоков энтальпия эрозионного разрушения стеклопластика в случае воздействия гетерогенного потока более, чем на два порядка величины превосходит энтальпию термохимического разрушения в условиях воздействия гомогенного сверхзвукового высокотемпературного потока воздуха.

Все результаты проведенного выше анализа указывают на сложность моделирования на экспериментальных стендах реальных условий, которым подвергаются композиционные ТЗМ в полёте в гетерогенных атмосферных аномалиях.



### **5.3.2. Особенности разрушения углеродных композиционных материалов при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков**

Композиционные углеродные материалы относятся к классу теплозащитных материалов, широко используемых в элементах конструкций высокоскоростной авиационной и ракетной техники. Композиция таких материалов состоит из углеродного наполнителя и углеродного связующего. К этому классу материалов относятся кристаллические графиты (например, графит В-1, ПГ-30 и др.), а также углерод-углеродные композиты (например, углерод-углеродный композиционный материал, УУКМ-1).

Особенность этих материалов выражается в том, что углеродные ТЗМ обладают высокой жаропрочностью. Они сохраняют свои механические свойства при температурах, превышающих  $2500\text{K}$ .

Однако основным недостатком этих материалов является их низкая термостойкость, определяемая процессом окисления поверхностного слоя материала даже при относительно низких температурах,  $T_w \leq 1000\text{K}$ .

Однако в случае формирования на поверхности углеродных материалов тонких защитных покрытий, блокирующих доступ кислорода, они становятся одними из лучших в системах тепловой защиты.

В этой связи вызывает повышенный интерес к исследованию характеристик материалов при воздействии как высокотемпературных гомогенных, так высокоскоростных гетерогенных потоков.

На рисунках 5.21÷ 5.24 приведены для сравнения фотографии образцов углерод-углеродных композиционных материалов до и после испытания в сверхзвуковых высокотемпературных гомогенных и высокоскоростных гетерогенных потоках.



1 – образец с тонким слоем SiC до испытаний, 2 – защитная втулка  
 Рисунок 5.21. Вид модели для испытаний образца УУКМ с тонким  
 поверхностным слоем SiC



*Плотность конвективного теплового потока  $q_0 = 5600 \text{ кВт/м}^2$ . Давление торможения потока  $P_0 = 1,0 \text{ МПа}$ . Температура поверхности  $T_w = 2500\text{К}$*

Рисунок 5.22. Поверхность образца УУКМ+SiC после испытаний в  
 высокотемпературном диссоциированном потоке воздуха

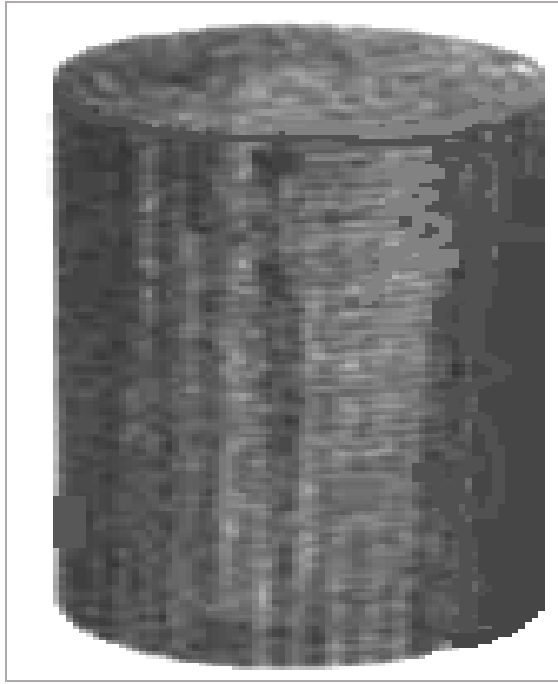
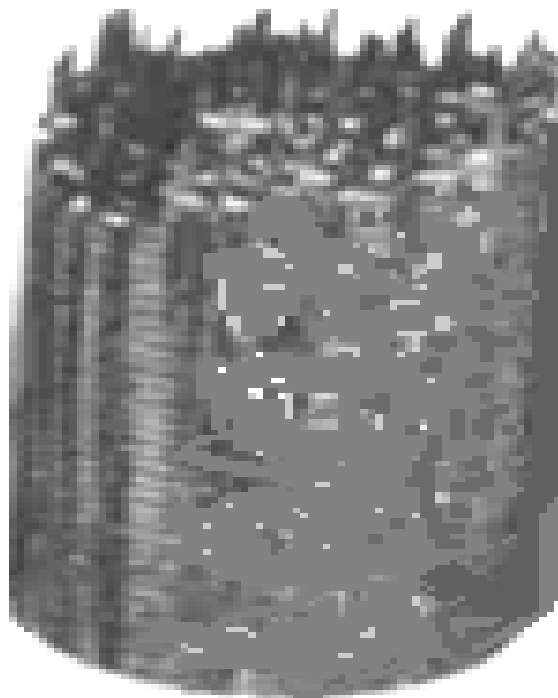


Рисунок 5.23. Вид образца УУКМ до испытаний в гетерогенном потоке.



*Параметры потока: давление торможения  $P_0 = 1,2$  МПа, частицы SiC дисперсностью  $d_p = (20 \div 50)$  мкм, среднеинтегральная температура поверхности  $T_w \approx 2000$  К.*

Рисунок 5.24. Вид образца УУКМ -1 после испытаний в сверхзвуковом высокотемпературном гетерогенном потоке

Из сравнения поверхностей образцов, воспринимающих воздействие набегающих, следует, что вид поверхности материала УУКМ, подвергнутому воздействию сверхзвукового гетерогенного потока, несравнимо отличается от

вида поверхности образца после испытания в высокотемпературном гомогенном потоке. Это обусловлено разными механизмами разрушения ТЗМ в гомогенных и гетерогенных потоках.

Как правило, механизмы разрушения теплозащитных материалов изучаются экспериментально, на комплексе высокотемпературных газодинамических стендов. Такой комплекс стендов воспроизводит широкий спектр траекторных параметров, который реализуется в натуральных условиях полета космических летательных аппаратов. В ходе такого исследования выявляются главные физико-химические процессы, определяющие механизм разрушения теплозащитных материалов, которые затем описываются функциональными зависимостями характеристик разрушения ТЗМ от траекторных параметров. Как отмечалось, основными траекторными параметрами, характеризующими интенсивность теплового и газодинамического воздействия на космический аппарат, являются:

- плотность конвективного теплового потока  $q_0$ ,  $Вт/м^2$ ;
- плотность лучистого теплового потока  $q_{луч}$ ,  $Вт/м^2$ ;
- давление торможения  $P_0$ ,  $Па$ ;
- удельная энтальпия торможения  $I_0$ ,  $Дж/кг$ ;
- поверхностные касательные напряжения  $\tau_w$ ,  $Н/м^2$ ;
- концентрация «К-фазы» при преодолении ГЛА пылевой и дождевой облачности.

Численные значения всех указанных выше параметров могут изменяться на траектории полёта аппарата в широких пределах.

Возможные диапазоны изменения основных траекторных параметров, воздействующих на тепловую защиту космических летательных аппаратов, приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Наименование фактора воздействия.	Величина
Температура торможения газового потока, $T_0$ .	до $10^4$ К
Температура поверхности ТЗП, $T_w$ .	до $4 \cdot 10^3$ К
Давление торможения потока, $P_0$ .	до $10^7$ Па

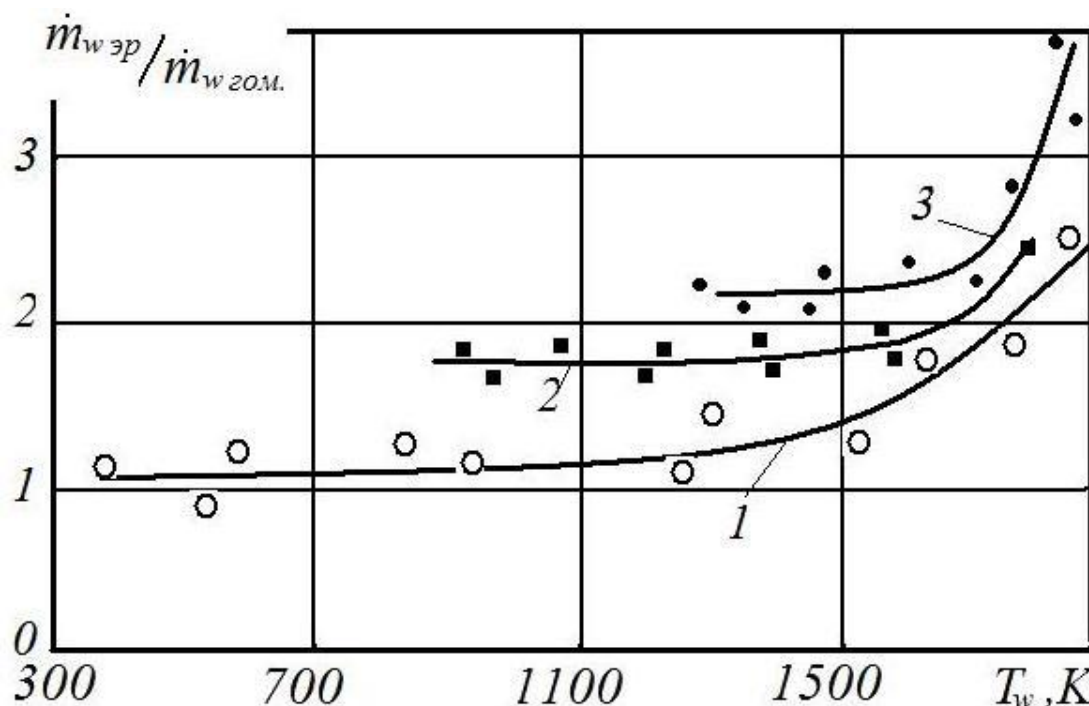
Наименование фактора воздействия.	Величина
Плотности конвективных и лучистых тепловых потоков.	до $10^5$ кВт/м <sup>2</sup>
Химический состав газов в атмосфере.	воздух, азот, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
Массовые концентрации «К-фазы» в набегающем потоке.	до 20%
Скорость твердых или жидких частиц при ударе о поверхность ТЗП.	до 5 км/с
Частота колебаний и акустической вибрации тепловой защиты.	до 100 Гц
Перегрузки при полете ГЛА в плотных слоях атмосферы.	до 100 ед.

Каждый из указанных в таблице факторов вызывает разрушение материалов теплозащитного покрытия только с присущими ему особенностями, что определяет в целом комплекс физико-химических процессов, составляющих в совокупности механизм разрушения ТЗМ.

Проанализируем далее особенности разрушения УУКМ в сверхзвуковых высокотемпературных гетерогенных потоках.

На рисунке 5.25 представлено изменение относительной эрозионной скорости уноса массы теплозащитного материала УУКМ-1 как функции температуры поверхности и дисперсности частиц SiC в потоке. При этом относительная эрозионная скорость уноса массы материала представлена в виде

отношения  $\frac{\dot{m}_{w,эр}}{\dot{m}_{w,гом.}}$ . В свою очередь,  $\dot{m}_{w,гом.}$  - скорость уноса массы материала при воздействии гомогенного высокотемпературного потока воздуха.



1 – дисперсность частиц SiC,  $d_p = (4 \div 10)$  мкм; 2 – дисперсность частиц SiC,  $d_p = (15 \div 25)$  мкм; 3 – дисперсность частиц SiC,  $d_p = (30 \div 50)$  мкм. Параметры гетерогенного потока:  $P_0 = 12 \cdot 10^5$  Па,  $I_0 \approx 2,5 \cdot 10^3$  кДж/кг, массовая концентрация частиц в потоке  $\sim 15\%$ .  
1 – данные работы [2], 2 и 3 – данные настоящей работы

Рисунок 5.25. Изменение относительной скорости уноса массы материала УУКМ-1 от температуры поверхности  $T_w$  и дисперсности частиц в потоке

Анализ представленных на рисунке данных показал, что:

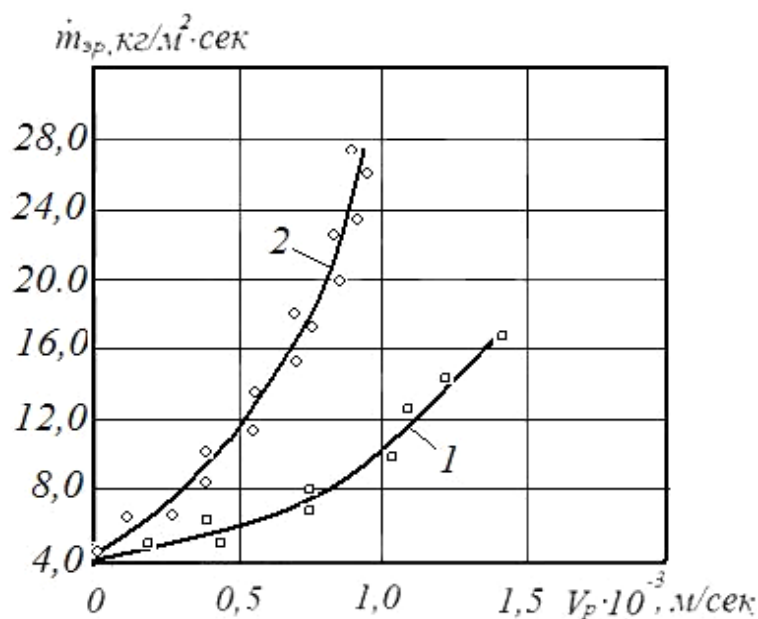
- во-первых, эрозионная скорость уноса массы материала интенсивно возрастает при достижении температуры поверхности уровня  $T_w > 1500$  K;
- во-вторых, эрозионная скорость уноса массы материала зависит от дисперсности падающих на поверхность высокоскоростных частиц. Скорость частиц в гетерогенном потоке изменялась в диапазоне ( $V_p \approx 170 \div 850$  м/с);
- в-третьих, при прочих равных условиях эрозионная скорость уноса массы композита УУКМ-1 всегда больше скорости уноса массы материала при воздействии гомогенного воздушного потока.

Установленные особенности механизма разрушения материала в сверхзвуковом гетерогенном потоке, очевидно, обусловлены следующими факторами.

Рост эрозионной скорости уноса массы материала УУКМ-1 при температуре поверхности  $T_w > 1500$  K обусловлен прежде всего образованием на поверхности

исследуемого образца твёрдого, но непрочного коксового слоя, который при воздействии высокоскоростных частиц сверхзвукового высокотемпературного гетерогенного потока, интенсивно разрушается. При этом из представленных на рисунке экспериментальных данных следует, что при прочих равных условиях частицы малой дисперсности  $d_p=(4\div 10)$  мкм вызывают менее интенсивную эрозию материала (кр.1 на рисунок 5.25), чем частицы более высокой дисперсности  $d_p=(30\div 50)$  мкм (кр. 3 на рисунок 5.25). Полученные в эксперименте результаты, очевидно, обусловлены тем, что перед исследуемым образцом, обтекаемым сверхзвуковым гетерогенным потоком, образуется отошедшая ударная волна и сжатый слой. В результате, при преодолении указанных вязких газовых аномалий частицы низкой дисперсности интенсивно тормозятся и достигают обрабатываемой поверхности с малой скоростью. В итоге, кинетической энергии частиц недостаточно, чтобы вызвать интенсивное эрозионное разрушение поверхностного коксового слоя. В этом случае механизм разрушения углеродистого коксового остатка обусловлен в основном его термохимическим разрушением [57]. Этот фактор устраняется в случае частиц с большей дисперсностью.

В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния угла падения частиц (угла атаки) сверхзвукового высокотемпературного гетерогенного потока на обрабатываемую поверхность. Исследование проведено в широком диапазоне изменения скорости дисперсных частиц  $V_p$ , воздействующих на поверхность образца из плотного графита В-1. Результаты исследований приведены на рисунке 5.26.



Параметры гетерогенного потока:  $P_0=12 \cdot 10^5$  Па,  $I_0 \approx 2,5 \cdot 10^3$  кДж/кг, дисперсность частиц SiC,  $d_p=(30 \div 50)$  мкм, массовая концентрация частиц в потоке  $\sim 15\%$ .

1- угол атаки частиц в потоке  $\alpha = 0^\circ$ , 2- угол атаки  $\alpha = 20^\circ$ .

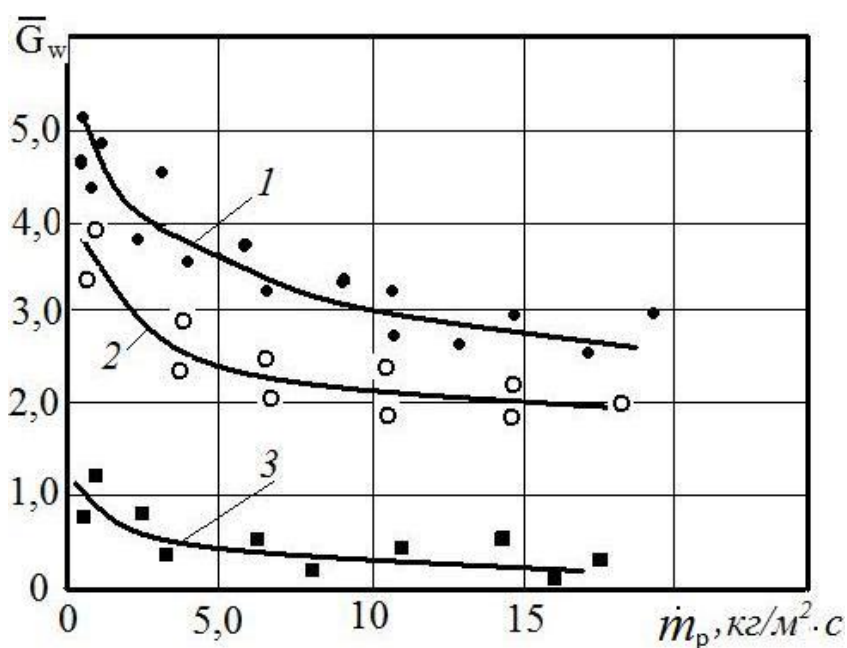
Рисунок 5.26. Изменение скорости уноса массы графита В-1 от скорости частиц гетерогенного потока при разных углах атаки

Из представленных на рисунке данных следует, что с увеличением угла атаки частиц значение эрозионной скорости уноса массы плотного графита В-1 более чем в два раза возрастает по сравнению с аналогичным параметром при нулевом угле атаки. При чём с увеличением скорости частиц влияние угла атаки проявляется более существенно<sup>4</sup>.

На рисунке 5.27 представлены данные экспериментальных исследований безразмерной скорости  $\bar{G}_w$  эрозионного разрушения некоторых конструкционных материалов в зависимости от изменения удельного расхода массы  $\dot{m}_p$  падающих на поверхность частиц SiC.

<sup>4</sup> Следует иметь в виду, что данный вывод справедлив для конкретного материала, в частности, графита В-1. Предварительные экспериментальные исследования показали, что при обработке гетерогенным потоком ТЗМ, обладающих невысокой микротвёрдостью, этот вывод не подтверждается.





Дисперсность частиц  $d_p = (10 \div 50)$  мкм, Давление торможения  $P_0 = 10 \cdot 10^5$  Па, Энтальпия торможения  $I_0 = 2520$  кДж/кг.

1 – стеклопластик ТЗМКТ-8, 2 – Графит В-1, 3 – сталь X18H10T

Рисунок 5.27. Зависимость безразмерной скорости эрозии  $\bar{G}_w$  некоторых конструкционных материалов от удельного расхода массы  $\dot{m}_p$  падающих на поверхность частиц SiC

Видно, что с увеличением  $\dot{m}_p$  безразмерная скорость эрозии  $\bar{G}_w$  всех исследованных материалов уменьшается. Такой характер изменения функции  $\bar{G}_w = f(\dot{m}_p)$  всех исследованных конструкционных материалов, очевидно, обусловлено несколькими определяющими факторами:

- во-первых, массовая концентрация частиц в потоке изменялась в пределах  $\sim (10 \div 57)\%$ ;
- во-вторых, дисперсность частиц в потоке изменялась в пять раз;
- в-третьих, исследуемые материалы обладали разной структурой и разными теплофизическими свойствами.

Предварительный анализ поведения функции  $\bar{G}_w = f(\dot{m}_p)$ , обусловленное указанными выше определяющими факторами, будем проводить с использованием понятия  $\bar{G}_{w,эп.}$ . Кроме того, с целью упрощения, анализ будем проводить с использованием кр. 3 рисунка 5.27 для лигированной стали X18H10T.

Итак, по определению, согласно (5.1) имеем:

$$\bar{G}_{w,эп} = \dot{m}_{эп} / \dot{m}_p \quad (5.11).$$

В таком случае, функция  $\bar{G}_w = f(\dot{m}_p)$  с увеличением  $\dot{m}_p$  будет уменьшаться только тогда, когда параметр  $\dot{m}_{эп}$  будет всегда меньше  $\dot{m}_p$  т.е., когда  $\dot{m}_p > \dot{m}_{эп}$ . Такой вариант возможен при реализации в эксперименте указанных выше факторов. Согласно первому фактору массовая концентрация частиц в набегающем потоке изменялась в широких пределах  $\sim (10 \div 57)\%$ .

Анализ представленных на рисунке 5.27 данных показал, что при уровне массовой концентрации частиц в набегающем потоке, составляющем  $\sim 10\%$  и ниже (см. кр. 3 рисунок 5.27),  $\dot{m}_{эп} > \dot{m}_p$ , поскольку  $\bar{G}_{w,эп} > 1$ . Однако с увеличением массовой концентрации частиц в набегающем потоке до уровня 20%, при этом  $\dot{m}_p = \sim 1 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$  (см. кр. 3 рисунок 5.27)  $\bar{G}_{w,эп}$  уменьшается и становится равной 1. При дальнейшем увеличении уровня массовой концентрации частиц в набегающем потоке  $\bar{G}_{w,эп}$  существенно снижается. Такой же характер поведения функции  $\bar{G}_{w,эп} = f(\dot{m}_p)$  наблюдается для всех исследованных материалов.

Объяснение установленному факту по мнению автора данной работы можно дать в следующей интерпретации.

Если в набегающем потоке доля массовой концентрации частиц существенно превышает 10%, упорядоченное движение частиц в объёме гетерогенного потока становится беспорядочным [91]. Частицы разной дисперсности взаимодействуют между собой. При этом частицы малой дисперсности при взаимодействии с более крупными частицами теряют свою скорость и не оказывают эрозионного воздействия на обрабатываемый материал. В результате  $\dot{m}_{эп}$  значительно снижается, что определяет уменьшение  $\bar{G}_{w,эп}$ . Аналогичные процессы реализовывались в экспериментах данной работы. Это обусловило поведение функции  $\bar{G}_{w,эп} = f(\dot{m}_p)$ , представленной на рисунке 5.27 для разных конструкционных материалов.

В свою очередь, различие структуры, а также разные теплофизические и механические свойства определяют уровень численных значений функции  $\bar{G}_{w,эp.} = f(\dot{m}_p)$  для каждого испытанного на стенде материала.

### Выводы по главе 5

По результатам исследований, проведённых в данной главе работы можно сделать следующие выводы:

1. проведён анализ физической модели процессов взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью преграды. Получены соотношения для расчёта ряда параметров, реализуемых в процессе взаимодействия. Показано, что, на сегодняшний день, пока ещё невозможно строго математически обобщить результаты исследований эрозионного разрушения конструкционных металлических и неметаллических материалов даже, например, от уровня температуры обрабатываемой гетерогенным потоком поверхности. Это обусловлено, прежде всего, сложностью задачи, то есть многопараметрической зависимостью механизма термоэрозионного разрушения конструкционных материалов. Полученные рядом авторов [2] эмпирические зависимости посредством обработки экспериментальных данных не находят широкого применения при проектировании высокоскоростных ЛА в связи с жёсткостью границ проведенных экспериментов;

2. проведен критический анализ механизма эрозии нагретых конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком. В результате установлено наличие для каждого рода конструкционных материалов некоего порогового значения скорости частиц и температуры, при достижении которых реализуется резкое увеличение интенсивности их эрозионного разрушения. Показано, что пороговые значения характерны и для других параметров, определяющих эрозионное разрушение материалов. К таким параметрам относятся:

- $m_p$  - удельная масса «К-фазы) гетерогенного потока, падающая на обрабатываемую поверхность в единицу времени, т.е. *кг/сек*;
- $V_p$  - скорость соударения частиц с поверхностью, *м/сек*.

В частности, с погрешностью до 10% рекомендованы соотношения для оценки пороговых значений скорости частиц и температуры поверхности;

3. предложена схема развития физического механизма эрозионного разрушения материалов (металлов), при воздействии частицами с постоянной скоростью. Составлен алгоритм развития этого механизма при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков;

4. проведён анализ полученных в работе экспериментальных данных. Показано, что эффективная энтальпия эрозии  $I_{эр}$  конструкционных металлических материалов уменьшается с увеличением температуры поверхности. Это обусловлено снижением микротвёрдости металлических материалов с увеличением температуры;

5. анализ полученных экспериментальных данных настоящей работы, а также данных других исследователей показал, что с относительной погрешностью  $\pm 15\%$  значение критической температуры  $T_{w,кр}$  для конструкционных металлических материалов можно оценить с использованием зависимости (5.6);

6. проведено экспериментальное исследование стеклопластических композиционных ТЗМ, на примере стеклопластика ТЗМКТ-8. Выявлен ряд особенностей механизма разрушения материалов при взаимодействии с высокоскоростными гетерогенными потоками. Установлено, что уменьшение эффективной энтальпии термоэрозионного разрушения стеклопластика  $I_{эф.эр}$  при увеличении дисперсности частиц обусловлено отсутствием потерь скорости частиц большей дисперсией при преодолении ударной волны, сжатого и пограничного слоя. Показано, что при прочих равных тепловых параметрах набегающих потоков энтальпия эрозионного разрушения стеклопластика в случае воздействия гетерогенного потока более, чем на два порядка величины превосходит энтальпию термохимического разрушения в условиях воздействия гомогенного сверхзвукового высокотемпературного потока воздуха;

7. проведено исследование механизма разрушения углерод-углеродных композиционных материалов двух типов: УУКМ-1 и плотного кристаллического графита В-1. Показано, что эрозионная скорость уноса массы УУКМ-1 интенсивно возрастает при достижении температуры поверхности уровней  $T_w > 1500 \text{ K}$ . Показано также, что эрозионная скорость уноса массы материала зависит от дисперсности падающих на поверхность высокоскоростных частиц и их скорости. Установлено, что при прочих равных условиях эрозионная скорость уноса массы композита УУКМ-1 всегда больше скорости уноса массы материала при воздействии гомогенного воздушного потока;

8. проведено экспериментальное исследование влияния угла падения частиц (угла атаки) сверхзвукового высокотемпературного гетерогенного потока на обрабатываемую поверхность. Показано, что с увеличением угла атаки частиц значение эрозионной скорости уноса массы плотного графита В-1 более чем в два раза возрастает по сравнению с аналогичным параметром при нулевом угле атаки. При чём с увеличением скорости частиц влияние угла атаки проявляется более существенно.

## Заключение

1. Проведен анализ использования гетерогенных потоков в транспортном и энергетическом машиностроении с целью сопоставления энергетических режимов и основных параметров применяемых гетерогенных потоков. Рассмотрены применяемые методы и средства моделирования процессов взаимодействия гетерогенных потоков с твердой стенкой с заданными параметрами.

2. Рассмотрена газодинамика гетерогенных потоков, отмечена необходимость применения допущений в виде модели взаимопроникающих континуумов и отражены границы ее применимости. Описаны основные силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу. Отмечены особенности взаимодействия дисперсной фазы и несущего потока, которые заложены в коэффициенте сопротивления  $C_D$ . Проанализированы зависимости для вычисления коэффициента сопротивления  $C_D$  для частиц сферической формы.

3. Проведен критический анализ методов и средств диагностики основных параметров при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой. Подробно рассмотрены:

- лазерная доплеровская анемометрия, как основной метод для измерения локальных скоростей, как газа-носителя, так и частиц.
- калориметрические методы измерения конвективного теплового потока от гетерогенной среды в исследуемый объект. Рассмотрены калориметры «стержневого» и «таблеточного» типа.
- контактные и бесконтактные методы диагностики температуры поверхности исследуемого объекта.

4. Предложена математическая модель газовой фазы и «К-фазы» для решения задачи обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. На основе данных моделей разработана расчётная схема для решения задачи с использованием CFD комплекса ANSYS CFX. Проведена серия вычислительных

экспериментов для наборов частиц разной дисперсности. Произведена визуализация и анализ полученных результатов. Показано, что:

- при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела перед КЛА как и в случае адекватного обтекания гомогенным гиперзвуковым потоком образуется отошедшая ударная волна и сжатый слой;
- параметры твердой фазы изменяются аналогично параметрам несущей фазы, но в силу инерционности «К-фазы», проходя ударную волну, они не изменяются скачкообразно;
- скорость изменения параметров «К-фазы» прямо пропорциональна диаметру частицы.

5. Проведён анализ термо-газодинамики течения сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока при натекании на плоскую преграду. Получены зависимости для расчёта скорости частиц разной дисперсности в гетерогенном потоке, вызывающих эрозию поверхности материала в момент удара о преграду и для расчёта температуры в зоне контакта при ударе высокоскоростных частиц полидисперсного гетерогенного потока о преграду.

6. Проведено экспериментальное исследование стеклопластических композиционных ТЗМ, на примере стеклопластика ТЗМКТ-8. Выявлен ряд особенностей механизма разрушения материалов при взаимодействии с высокоскоростными гетерогенными потоками. Установлено, что уменьшение эффективной энтальпии термоэрозионного разрушения стеклопластика  $I_{эф.эр}$  при увеличении дисперсности частиц обусловлено отсутствием потерь скорости частиц большей дисперсией при преодолении ударной волны, сжатого и пограничного слоя. Показано, что при прочих равных тепловых параметрах набегающих потоков энтальпия эрозионного разрушения стеклопластика в случае воздействия гетерогенного потока более, чем на два порядка величины превосходит энтальпию термохимического разрушения в условиях воздействия гомогенного сверхзвукового высокотемпературного потока воздуха;

7. Проведено исследование механизма разрушения углерод-углеродных композиционных материалов двух типов: УУКМ-1 и плотного кристаллического графита В-1. Показано, что эрозионная скорость уноса массы УУКМ-1 интенсивно возрастает при достижении температуры поверхности уровней  $T_w > 1500 \text{ K}$ . Показано также, что эрозионная скорость уноса массы материала зависит от дисперсности падающих на поверхность высокоскоростных частиц и их скорости. Установлено, что при прочих равных условиях эрозионная скорость уноса массы композита УУКМ-1 всегда больше скорости уноса массы материала при воздействии гомогенного воздушного потока;

8. проведено экспериментальное исследование влияния угла падения частиц (угла атаки) сверхзвукового высокотемпературного гетерогенного потока на обрабатываемую поверхность. Показано, что с увеличением угла атаки частиц значение эрозионной скорости уноса массы плотного графита В-1 более чем в два раза возрастает по сравнению с аналогичным параметром при нулевом угле атаки. При чём с увеличением скорости частиц влияние угла атаки проявляется более существенно.



### Список литературы

1. Никитин П.В. Гетерогенные потоки в инновационных технологиях. – М.: Янус-К, 2010. – 244 с.
2. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. – М.: Янус-К, 2007. – 392 с.
3. Клейс И.Р., Уэзмыйс Х.Х. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия. – М.: Машиностроение, 1986. – 157 с.
4. Nikitin P.V. Heat Protection of Spacecrafts // Report of Second Russian – Chinese Scientific Conference "Aero - and Space Engines Power Plants", 1992 – 8с.
5. Nikitin P.V. Problem issues of development Thermal Protection Systems for Spacecraft // The paper of the First International Conference on Aerospace Heat Exchanger Technology, Palo Alto, California, USA. February, 1993. – С. 56 – 60.
6. Nikitin P.V. The Thermal Protection Systems for Spacecraft // The paper of The 6-th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering. Seoul, Korea, May, 1993. – С. 42 – 47.
7. Вараксин А.Л. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами. М.: Физматлит, 2008. – 312 с.
8. Осипцов А.Н., Шапиро Е.Г. Влияние мелкодисперсной примеси на структуру пограничного слоя при гиперзвуковом обтекании затупленного тела // МЖГ. 1986. № 5. – С. 55.
9. Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. – Новосибирск: Наука, 1980. – 159 с.
10. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. — М.: Машиностроение, 1974. – 212 с.
11. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 245 с.

12. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. – Машиностроение, 1976. – 224 с.
13. Василевский Э.Б., Осипцов А.Н., Чирихин А.В., Яковлева Л.В. Теплообмен на лобовой поверхности затупленного тела в высокоскоростном потоке, содержащем малоинерционные частицы // ИФЖ. 2001. Т. 74. № 6. – С. 25.
14. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Взаимодействие двухфазной струи с твердым телом с образованием “хаоса” частиц // ТВТ. 2013. Т. 51. № 4. – С. 598.
15. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Исследование обтекания тела газодисперсным потоком с большой массовой долей твердых частиц // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 4. С. 65.
16. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Особенности обтекания затупленного тела сверхзвуковой струей с закруткой отраженных частиц // ТВТ. 2011. Т. 49. № 1. С. 73–80.
17. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Математическая модель обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой // Тепловые процессы в технике. – 2015. – N11. – С. 490-497.
18. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой // Тепловые процессы в технике. – 2015. – N12. – С. 558-565.
19. Деревенщиков В.Б., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Шебеко В.Н. Возможности моделирования и стенды для теплоэрозионных исследований. – М.: Предпринт/ИВТАН, 1994. №2. 62с.
20. Кондрашов Э.К., Владимирский В.Н. Эрозионостойкие лакокрасочные покрытия. – М.: Химия, 1989.
21. Бирюков В.И., Виноградов В.Н., Мартиросян М.М. и др. Абразивное изнашивание газопромыслового оборудования. – М.: Недра, 1967.
22. Поволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техника, 1989.

23. Спринжер Дж.С. Эрозия при воздействии капель жидкости. – М.: Машиностроение, 1981. – 200 с.
24. Буляккулов М.М., Головнев И.Г., Лапшин К.В., Платов С.А., Семенов А.С. Численное моделирование процесса выхода АСП из отсека самолета-носителя с оценкой совместимости и безопасности применения. // Сборник тезисов докладов II Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». Москва. ГосНИИАС. 21-22 ноября 2013. С. 184.
25. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев В.Б. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
26. Гущин В.В., Колосов Б.И., Потапов И.Н. Исследование соударения высокоскоростных частиц с полубесконечной преградой при учете инерционности тепловых процессов. – М.: Предпринт/ЦНИИАИ, 1983.
27. Поволоцкий Е.А., Ясев А.Г., Гришин В.С., Маринченко И.А. Имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1987. – №4. – С. 182–188.
28. Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.Н., Попов Н.Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. – М.: Наука, – 1974.
29. Полежаев Ю.В. Методы и средства газодинамических испытаний летательных аппаратов. – М.: МАИ, 1983. – 89 с.
30. Полежаев Ю.В., Шишков А.А. Газодинамические испытания тепловой защиты. Справочник. – М.: Промедэк, 1992. – 248 с.
31. Patent USA № 3893335, cl. 73 – 147. Device for simulating reentry conditions in a particle laden atmosphere / Johnson R., Von Ohin H. – 1975.
32. Игнатов С.Ф., Репин И.В., Сахаров В.П. Установка для испытания материалов на износостойкость при ударе твердых частиц // Заводская лаборатория. – 1981. – Т.47, N18. – С.89 – 91.

33. Игнатов С.Ф., Михатулин Д.С., Чирков И.В. Результаты исследования движения частиц в сопле Лаваля // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1982. – №4. – С. 163-167.
34. Shneider P.J. Reentry weather erosion simulator // AIAA Paper N78 – 816.
35. Рахматуллин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред // ПММ, 1956. – Т.20, вып.2. – С. 184-195.
36. Elghobashi S. Particle-Laden Turbulent Flow: Direct Simulation and Closure Models // Applied Scientific Research, 1991. – V.48. – P. 301.
37. Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. – Новосибирск.:Наука, 1980. – 159 с.
38. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – 2-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. – 423 с.
39. Henderson C. B. Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows // AIAA Journal, 1976. – V.14. – P. 707.
40. Лазерная диагностика потоков. Под ред. В.А. Фабриканта. – М.: Изд-во МЭИ, 1990. – 287 с.
41. Ринкевичюс Б.С. Лазерная анемометрия. — М.: Энергия, 1978. – 159 с.
42. Лазерное доплеровское измерение скорости газовых потоков. Сб.№1 / Под общ. ред. Г.Л. Гродзовского. – М.: Изд. ЦАГИ, 1976. – 286 с.
43. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А., и др. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1980. – 172 с.
44. Меснянкин С.Ю., Никитин П.В. Система диагностики высокотемпературных газовых потоков. Учебное пособие. – Москва, МАИ, 1991. – 56с.
45. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
46. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831с.

47. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. – М.: Машиностроение, 1972. – 332 с.
48. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Metallurgy, 1977. – 477 с.
49. Гордов А.Н., Жугалло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.
50. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар. Справочник. – М.: Metallurgy, 1983. – 360 с.
51. Чернин СМ., Коган А.В. Измерение температуры малых тел пирометрами излучения. – М.: Энергия, 1980. – 95 с.
52. Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: учеб. для авиационных специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.
53. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Тепломассообмен, термохимическое и термоэрозионное разрушение тепловой защиты. Курс лекций. – М.: ЯНУС-К, 2011. – 520 с.
54. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Гостехиздат, 1953.
55. Лепешинский И.А. Газодинамика одно- и двухфазных течений в реактивных двигателях. – М.: Издательство МАИ, 2003.
56. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. // Сборник тезисов докладов 14-й Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2015». Москва. МАИ. 16-20 ноября 2015. С.388-389.
57. Никитин П.В. Тепловая защита: учеб. Высшей школы. – М.: Изд. МАИ, 2006. - 512 с.
58. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

59. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 504 с.
60. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 2 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
61. Д. Л. Ревизников, А. В. Способин. Численное моделирование воздействия дисперсной фазы на поверхность затупленного тела в сверхзвуковом запыленном потоке // Математическое моделирование, 2007. – С.101–111.
62. Tshirkunov Yu.M. Gas-particle flows around bodies – key problems. Modeling and numerical analysis // Proc. Fourth International Conference on Multiphase Flow (Ed.: E. Michaelides), May 27 – June 1, 2011, New Orleans, USA. – CD ROM Proc. ICMF'2001, paper №609. – 31 p.
63. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press LLC, 1998. – 471 p.
64. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком космического летательного аппарата. // Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». Москва. ЦИАМ имени П.И. Баранова. 24-27 ноября 2015. С.330-331.
65. ANSYS CFX v.10. Release. Theory Reference.
66. Chung T. J. Computational Fluid Dynamic. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 1021 p.
67. Ferziger J. H., Perić M. Computatational Methods for fluid Dynamics. – 3, rev. ed. – Berlin: Springer, 2002. – 423 p.
68. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Решение задачи взаимодействия неизотермического гетерогенного потока с поверхностью высокоскоростного летательного аппарата. // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Алушта. 25-31 мая 2016. С.65-67.
69. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.

70. О.М. Белоцерковский и др. Обтекание затупленных тел сверхзвуковым потоком газа. – М.: Изд. АН СССР, 1966.
71. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Репин И.В. Гетерогенные потоки: газодинамика, теплообмен, эрозия. М.: Препринт ИВТАН, 1997. №2. 402 с.
72. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.С. Моделирование процесса теплоэрозионного воздействия двухфазных сред. МЖГ - М.: изд. АН СССР, 1989. №4. С. 92 – 98.
73. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1994, 320с.
74. Полежаев Ю.В. О механизме взаимодействия атмосферных образований на летательные аппараты. Сборник статей: Исследование высокоскоростных ударных явлений. – М.: ВВНА им. Жуковского Н.Г., 1981. С. 29 – 43.
75. Лойтянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: «Наука», 1973, 847с.
76. Семилетенко Б.Г., Усков В.Н. Экспериментальные зависимости, определяющие положение ударных волн в струе, истекающей на преграду, перпендикулярно ее оси. // ИЖФ, 1972. XXIII. № 3. С.453 – 458.
77. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Течения газа в соплах - М.: Издательство МГУ, 1978. – 351 с.
78. Волков В.А., Маслов Б.Н., Пирумов У.Г. Зависимость потерь удельного импульса сопла Лавалья от характера протекания кристаллизации частиц конденсата. // Течение разреженного газа с частицами/. Сборник трудов VIII Всесоюзной конференции по динамике разреженных газов. М.: МАИ, 1987.
79. Костиков В.И., Митин Б.С. О движущей силе растекания жидкой фазы по твердой; Сб. Высокотемпературные материалы. М.: Metallургия, 1986.
80. Перельман Р. Г. Эрозия элементов двигателей энергоустановок. – М.: Машиностроение, 1986. 251 с.
81. Мак-Куин Р., Марш С. Динамические испытания твердых тел при высоких давлениях. — М.: Мир, 1965. 93 с.

82. Никитин П.В., Степаненко С.А. Газодинамика и межфазный теплообмен при натекании сверхзвукового гетерогенного потока на преграду. // Поиск, 2008, т.15, №5, С. 34-40.
83. Ададулов Г.А., Бавина Т.В., Бреусов О.Н., Дремин А.Н., Клопова Е.Н., Таций В.Ф. О химических процессах при ударном сжатии. - ВИНТИ, деп. №328 – 68 .
84. Степаненко С.А. Теплофизика и межфазный теплообмен при формировании защитных покрытий низкотемпературным газодинамическим методом. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – М.: МАИ, 2008.
85. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно - газового напыления покрытий. – М.: Наука, 1978. 223 с.
86. Альтшуллер Л.Л. Успехи физических наук. 1965, т. 65, вып.7. 197 с.
87. Яворский Б.М. и др. Справочник по физике. – М.: Наука, 1974. С. 259.
88. Харламов Ю.А. Механизм пластической деформации при формировании газотермических покрытий. // Порошковая металлургия, 1981. №12. С. 31 – 35.
89. Никитин П.В., Степаненко С.А. Тепло – и массообмен при формировании разнофункциональных покрытий сверхзвуковым гетерогенным потоком. // V-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика», МАИ, 2006.
90. Альтшуллер Л.Л. Применение ударных волн в физике высоких давлений // Успехи физических наук. 1965, т. 85, вып. 2, с. 199 – 258.
91. Р.И. Нигматуллин, Динамика многофазных сред. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, 464 с.