

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

На правах рукописи

Тизилов Андрей Сергеевич

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ
ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

01.04.17 - Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент Егоров А.Г.

Тольятти, 2017

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВОСПЛАМЕНЕНИЮ И ГОРЕНИЮ ДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ.....	12
1.1 Современная модель горения частицы алюминия	12
1.2 Особенности горения аэровзвеси частиц алюминия.....	18
1.3 Влияние параметров процесса горения аэровзвеси на характеристики продуктов сгорания.....	25
1.4 Схемы организации рабочего процесса в двигательных и технологических установках	32
1.5 Анализ литературного обзора и постановка задач исследования.....	42
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	47
2.1 Экспериментальная установка и оборудование	47
2.2 Методика проведения исследования.....	53
2.3 Расчёт погрешности измерений.....	57
3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ	59
3.1 Математическое моделирование течения в камере сгорания	59
3.2 Исследование структуры течения потока аэровзвеси в форкамере	66
3.3 Выводы.....	70
4 ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ.....	71
4.1 Экспериментальное исследование процесса воспламенения потока аэровзвеси частиц алюминия	71
4.2 Влияние турбулентности на развитие начального очага.....	83
4.3 Границы зажигания в потоке аэровзвеси частиц алюминия	86
4.4 Выводы.....	97
5 СТАБИЛИЗАЦИИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ.....	99
5.1 Исследование механизма стабилизации пламени	99
5.2 Зажигание основного потока аэровзвеси продуктами сгорания зоны рециркуляции	105
5.3 Определение границ стабилизации пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия	112
5.4 Выводы.....	121
6 УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ.....	123

6.1 Оптимизация внутрикамерных процессов	123
6.2 Метод управления характеристиками горения аэровзвеси частиц алюминия в форкамере	127
6.3 Исследование характеристик горения алюминиево-воздушного факела 136	
6.4 Метод управление характеристиками горения алюминиево-воздушного факела	140
6.5 Выводы	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫВОДЫ	148
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ	164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Известно, что процессы горения металлов являются экзотермическими, протекают при высокой температуре и с большими скоростями. Обладая большой теплотой сгорания и высокой плотностью, порошкообразные металлы способны существенно увеличить такие важные характеристики двигательных установок, как удельные массовые и объемные импульсы тяги. Сжигая в технологической установке распыленные в активном газе порошкообразные металлы, можно синтезировать новые порошковые материалы [1].

Полученные ранее результаты исследований горения дисперсных металлов, распыленных в потоке активных газов, позволили заложить теоретические основы проектирования и расчёта рабочих процессов в прямоточных камерах сгорания двигательных и технологических установок [2-15].

При проектировании двигательных и технологических установок на порошкообразных металлах разработчикам необходимо решить ряд задач, связанных с организацией рабочего процесса в камере сгорания. В первую очередь это - обеспечение надёжного зажигания в потоке металлогазовой смеси, стабилизации фронта пламени и эффективного процесса горения.

В настоящее время не существует универсального способа сжигания порошкообразного алюминия (Al), удовлетворяющего всем требованиям работы двигательных и технологических установок на порошкообразных металлах. В связи с этим использование порошкообразного Al в качестве источника энергии в двигательных и технологических установках основано на решении задач по созданию методов и средств управления процессами горения дисперсных частиц Al распыленных в турбулентном потоке воздуха и организацией эффективных внутрикамерных процессов протекающих в них.

Новые виды двигательных и технологических установок, в которых порошкообразные металлы являются источником энергии, предусматривают широкий диапазон изменения режимных параметров, (скорости потока аэрозвеси частиц металла, соотношения компонентов в камере сгорания, дисперсности частиц металла и т.д.). Поэтому их влияние на воспламенение, стабилизацию фронта пламени и процесс сгорания необходимо знать для организации эффективного рабочего процесса в камере сгорания.

Существующие на сегодняшний день схемы организации рабочего процесса в прямоточных камерах сгорания двигательных установок и установок газодисперсного синтеза [3,9,10] не обладают необходимым набором методов и средств управления внутрикамерными процессами.

Надежное воспламенение во время запуска, при котором возможен самоподдерживающийся режим горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия, имеет первостепенное значение для любых двигательных и технологических установок. Для двигательных установок летательных аппаратов существенно, кроме того требование быстрого повторного воспламенения аэрозвеси в камере после срыва пламени в полете.

В настоящий момент отсутствуют компактные, надежные и эффективные системы зажигания. В прямоточной камере двигательной установки [16,17] зажигание осуществлялось электрической дугой, которая обеспечивала воспламенение потока аэрозвеси частиц алюминия при скорости ≤ 20 м/с. Тогда как реальные скорости в прямоточных камерах двигательных установок достигают нескольких сотен метров в секунду.

В форкамере технологической установки газодисперсного синтеза в [18] аэрозвесь частиц алюминия воспламенялась струей высокотемпературных продуктов сгорания твёрдотопливного газогенератора. В качестве воспламеняющего состава использовался заряд металлизированного смесового топлива. Недостатком данной системы зажигания, является отсутствие возможности повторного запуска установки в случае неудачного воспламенения.

Схемы организации рабочего процесса и стабилизация фронта пламени в прямоточных камерах сгорания двигательных установок посредством перфорированных пластин и плохобтекаемого тела в [16] не позволяет стабилизировать пламя в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха и скорости потока аэрозвеси частиц алюминия. Скорость набегающего потока аэрозвеси свыше 20 м/с приводит к уменьшению времени пребывания частиц Al в зоне рециркуляции и срыву пламени.

Для стабилизации фронта пламени в форкамере установки газодисперсного синтеза в [18] необходимо поддерживать низкую скорость потока аэрозвеси ~ 10 м/с и обеспечивать значение коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,04 \div 0,3$. Сгорание аэрозвеси частиц алюминия в данном диапазоне значений коэффициента избытка воздуха сопровождается реакцией азотирования, продуктом последней является нитрид алюминия AlN_K , который негативно влияет на химическую чистоту конечного продукта. Для устранения указанного недостатка, воспламенение и стабилизацию пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия необходимо осуществлять при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 1$.

В двигательных установках одной из основных характеристик является удельный импульс тяги, которая зависит от полноты сгорания порошкообразного алюминия. Полнота сгорания частиц Al в большей степени определяется временем химического реагирования последних и функционально связана с временем пребывания τ_{np} продуктов сгорания в камере. Время пребывания в камере сгорания частиц горючего и окислителя определяет аэродинамическая структура потока [19]. Поэтому аэродинамикой течения потока аэрозвеси будет определяться локальное время пребывания частиц Al в камере сгорания, от которого зависят основные характеристики рабочего процесса, в том числе и полнота сгорания. Следовательно, для увеличения времени пребывания τ_{np} необходимы механизмы управления гидродинамикой течения в камерах

сгорания двигательных и технологических установок.

Установление закономерностей процессов смешения, воспламенения, стабилизации пламени и сгорания в потоке аэрозвеси частиц алюминия с учетом всех факторов, влияющих на эти процессы, - многоплановая и, пожалуй, наиболее сложная задача, как в теории, так и практики создания двигательных и технологических установок.

На основании вышеизложенного возникает необходимость поиска новых подходов к организации внутрикамерных процессов в двигательных и технологических установках на основе разработки методов и средств управления процессами горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия.

Целью работы является разработка методов и средств управления процессами горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- Выполнить моделирование структуры течения потока аэрозвеси частиц алюминия в вихревой камере сгорания и установить зависимость времени пребывания частиц алюминия от параметра закрутки.
- Экспериментально исследовать структуру течения и определить локальное время пребывания частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением.
- На основе модели очагового теплового зажигания определить критический радиус очага и условия воспламенения аэрозвеси частиц алюминия в зоне рециркуляции.
- Определить границы воспламенения и стабилизации фронта пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 0,1 \div 3,0$.
- На основе выявленных особенностей и установленных закономерностей по воспламенению, горению и стабилизации пламени

разработать методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

Методы исследования. Метод решения данных задач носит экспериментально-теоретический характер, базирующийся на современных представлениях о физических процессах, протекающих как на поверхности частиц алюминия, так и в объёме камеры сгорания. В диссертационной работе также использовались методы математического моделирования.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в том, что получены новые знания о скорости распространения пламени в аэровзвеси частиц алюминия. Впервые выявлен второй максимум на кривой зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха. Второе максимальное значение скорости распространения пламени при $\alpha \approx 1$ совпадает с максимальными значениями тепловыделения и температуры горения аэровзвеси частиц алюминия стехиометрического состава, полученные термодинамическими расчетами Малининым В.И. и др.

- Впервые на основе тепловой теории очагового зажигания определён критический радиус начального очага и условие зажигания в потоке аэровзвеси частиц алюминия;
- Установлены закономерности влияния интенсивности турбулентности на развитие начального очага зажигания и выявлены особенности процесса воспламенения в потоке аэровзвеси частиц алюминия;
- Определена область надежного воспламенения в потоке аэровзвеси частиц алюминия и выявлено влияние начальных параметров потока на границы зажигания;
- Впервые экспериментально была получена зависимость скорости срыва пламени от коэффициента избытка воздуха $U_{cp} = f(\alpha)$ в широком диапазоне изменения состава смеси ($\alpha \approx 0,1 \div 3,0$).

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается значительным объемом экспериментальных данных, использованием современных методов измерений и обработки;

сопоставлением полученных результатов с результатами, полученными другими авторами, а также известными эмпирическими данными взаимодействия частиц алюминия с окислительными средами.

Практическая значимость. Экспериментальные данные, полученные в диссертационной работе, рекомендуется использовать при разработке математических моделей процессов воспламенения и горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия, определения условий возникновения пожаров в трубопроводах при пневмотранспортировки порошкообразного алюминия, а также для организации внутрикамерных процессов в двигательных и технологических установках.

На основе полученных результатов исследования предложен способ получения нанодисперсных порошков и устройство для его осуществления (патент на изобретение № 2462332).

Разработано фронтное устройство камеры сгорания реактивного двигателя на порошкообразном металлическом горючем (патент на полезную модель № 112348).

Результаты исследований и разработанные на их основе методы и средства управления процессами горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия, использовались Федеральным казенным предприятием «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем» при организации рабочего процесса в камере сгорания специальной энергетической установки.

Полученный в диссертационной работе теоретический и экспериментальный материал также использовался в Тольяттинском государственном университете (ТГУ) при чтении курса лекций и проведении практикумов по дисциплине «Теория горения и взрыва» для студентов, обучающихся по профилю 280705.62 «Пожарная безопасность» и студентов обучающихся по профилю 150100.62 «Материаловедение и технологии наноматериалов и наносистем».

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований характеристик течения аэровзвеси частиц алюминия в модели вихревой камере сгорания и прямоточной камере с внезапным расширением.
2. Данные экспериментальных исследований процесса воспламенения потока аэровзвеси частиц алюминия электрическим разрядом.
3. Экспериментальные данные по определению границ воспламенения и стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия.
4. Результаты экспериментальных исследований характеристик горения алюминиево-воздушного факела.
5. Методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXXIX Уральском семинаре «Механика и процессы управления» (Миасс, 2009); XXIV научной конференции стран СНГ «Дисперсные системы» (Одесса, 2010); VII Всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (Самара, 2010); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2011); VIII Всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (Самара, 2012); Международном научно-техническом форуме (Самара, 2012); XI Международной конференции «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2012); Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки» (Москва, 2013); VIII Международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки (Непряхино, Челябинская обл., 2013); Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2014); Всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: эффективность, надежность,

безопасность" (Томск, 2014); Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки» (Москва, 2015); 7-й международной конференции «Космический вызов XXI века. Новые материалы, технологии и приборы для космической техники (Севастополь, 2015), XXVII международной научной конференции «Дисперсные системы» (Одесса, 2016).

Основные результаты диссертации отражены в трудах вышеперечисленных конференций, а также в журналах «Химическая физика», «Вестник СГАУ им. Академика С.П. Королева» и других входящие в список изданий, рекомендованных ВАК.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 26 научных работ, из них 2 статьи в журнале индексируемом в базе данных Scopus, 7 статей рецензируемых в изданиях рекомендованных ВАК РФ, а также получены 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 117 наименований, приложения. Диссертация изложена на 180 страницах, содержит 74 рисунка и 16 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю доктору технических наук, доценту Егорову А.Г. за оказанное внимание и поддержку, в процессе работы над диссертацией.

Благодарит сотрудников НОЦ «Физика горения энергоемких материалов», за оказанную помощь в проведении экспериментов, а также сотрудников кафедры «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета за участие в дискуссии по обсуждению изложенных в диссертации результатов.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВОСПЛАМЕНЕНИЮ И ГОРЕНИЮ ДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ

1.1 Современная модель горения частицы алюминия

За последнее столетие наукой накоплен огромный теоретический и экспериментальный материал по окислению и горению металлов в газообразных и жидких средах. Особое положение занимает окисление металлов в порошкообразном состоянии [20,21,22].

Отечественными и зарубежными школами горения подробно изучено поведение порошкообразных металлов в высокотемпературных окислительных средах. В бывшем СССР в тот период времени сформировалось несколько научных школ горения металлов. Необходимо отметить большой вклад в развитие теории и практики горения металлов, ведущих научных школ таких как, института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН; Института проблем химической физики РАН; Института химической кинетики и горения СО РАН; Отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН; НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета; МВТУ им. Н.Э. Баумана; РХТУ им. Д.И. Менделеева; БГТУ им. Д.Ф. Устинова; ФЦДТ «Союз»; ОГУ им. И.И. Мечникова; Института неорганической химии АН Латвийской ССР, а также многих отраслевых институтов.

Особый вклад в формирование советской (российской) школы горения металлов внесли Н.Н. Семенов, Н.Н. Бахман П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, Б.И. Хайкин, А.Г. Мержанов, О.Л. Лейпунский, И.П. Боровинская, В.М. Шпаро, В.Э. Лорян, Ю.М. Максимов, В.И. Итин, В.Э. Зарко и многие другие [21].

В настоящее время существуют большое количество публикаций относительно применения дисперсных порошков алюминия в качестве источника энергии для двигателей летательных аппаратов [1,2,5,7,23], а также исходного материала для синтеза нанодисперсных порошков (НДП) оксида алюминия [4, 8,18, 24, 25, 26]. В обоих случаях применение

порошкообразного алюминия обусловлено процессом экзотермической реакции окисления в турбулентном потоке активного газа, в качестве которого, как правило, используется воздух.

Одна из первых теорий горения частицы алюминия была предложена Бржустовским Т. и Глассменом И. [27]. Данная теория основывалась на теории диффузионного парового горения капель углеводорода. Модель горения может быть применима для частиц алюминия, магния, бериллия и т.д. Схема парового модели горения частицы алюминия представлена на рисунке 1.1.

Сферическая частица расплавленного металла А окружена находящейся от неё на некотором расстоянии бесконечно тонкой зоны реакции В. С обеих сторон зона реакции граничит с областью неподвижного газа: со стороны частицы – сферической областью АВ, со стороны окружающей атмосферы – областью ВС. Внешняя граница ВС принимается находящейся в бесконечности. Считается, что горючее и окислитель диффундируют в зону реакции в стехиометрическом соотношении. Модель предполагается изобарической и квазистационарной.

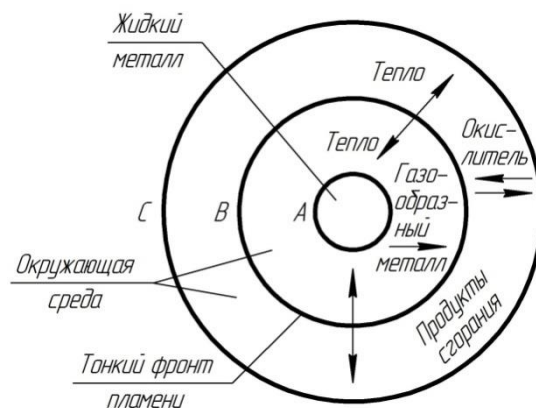


Рисунок 1.1 - Схема парового модели горения частицы алюминия [27]

В теоретическом анализе учитываются пять основных физических процессов: 1) испарение частицы, находящейся при температуре T_A ;

2) диффузия окислителя в зону пламени через область ВС; 3) диффузия парообразного металла от поверхности частицы в зону пламени В, через область А; 4) перенос тепла из зоны пламени В к поверхности частицы (теплопроводностью и излучением); 5) теплоотвод из зоны пламени (теплопроводностью и излучением) в окружающую среду.

Полученные выводы в общих чертах отражают экспериментально наблюдаемые особенности горения частиц алюминия и магния – зависимость скорости процесса от концентрации окислителя, соотношение между зоной горения и радиусом частицы, степень влияния температуры среды. Но рассчитанные по этой теории скорости горения (испарения) частиц мелкодисперсного алюминия даже для среды, в которой основным окислителем является кислород, значительно отличаются (занижены) от эксперимента. По заключению самих авторов, значение предполагаемой теории состоит в том, чтобы показать вероятность и некоторые особенности парофазного горения капель алюминия и магния при благоприятных условиях окружающей среды [22].

Рассмотренная выше, и другие теории парофазного горения [28-30] не раскрывали причин образования полых сфер и явления вращения частиц, не объясняли уменьшение времени горения частиц алюминия с повышением давления.

Дальнейшее развитие теории горения представлено в работе [31], где были частично учтены недостатки предыдущих моделей. Существенное продолжение в своем развитии модель горения частицы получила в работе [32]. В которой авторы отказались от понятия бесконечно узкого фронта пламени вокруг частицы алюминия, и было принято, что окисление продуктов испарения происходит в объёме, окружающем частицу. Схема данной модели образования оксида алюминия на поверхности частицы алюминия в процессе горения представлена на рисунке 1.2.

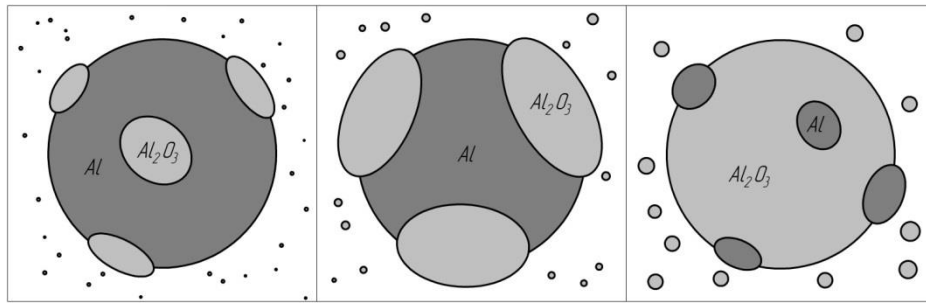


Рисунок 1.2 - Схема образования оксида на поверхности частицы и в объёме потока [32]

Основные положения модели:

1. Окисление металла, образование конденсированного оксида и выделение тепла при горении частицы алюминия происходит в двух зонах: в газе вокруг частицы при взаимодействии продуктов испарения частицы и окислителя и на поверхности частицы металла за счёт проникновения к ней окислителя.

2. Зона химической конденсации в газе представляет собой широкую область, простирающуюся на значительные расстояния от поверхности частицы металла.

3. Реакция конденсации в зоне конденсации только слабо меняет распределения концентрации и температуры вблизи частицы и, следовательно, не оказывает заметного влияния на скорость горения.

4. Процессом, определяющим скорость горения частицы, является гетерогенное окисление металла на поверхности частицы.

5. В области вокруг горячей частицы металла в процессе газофазной конденсации образуются мелкие субмикронные частицы оксида.

6. Конденсат, образующийся на поверхности металла, служит причиной образования в продуктах сгорания крупных частиц оксида, размером порядка исходной частицы металла.

7. Облако мелких конденсированных частиц оксида экранирует поверхность частицы алюминия, препятствует теплообмену излучением поверхности частицы с окружающей средой.

8. На поверхности частицы устанавливается локальное термодинамическое равновесие.

9. Конденсированный оксид на поверхности горячей частицы алюминия не препятствует испарению и окислению металла частицы.

В целом, изложенная в [32] модель более полно отражает известные экспериментальные факты. Однако в случае горения мелких частиц алюминия в среде низкого давления положение 8 не соответствует истине, так как оно предполагает бесконечную скорость химических реакций на поверхности частицы. Но именно в случае низких давлений и мелких частиц необходимо учитывать кинетику химических реакций.

Автором в [32] предложена физическая модель горения частицы алюминия, в которой приняты основные представления и допущения модели [31], кроме представления о локальном термодинамическом равновесии на поверхности частицы, которое непосредственно вытекает из допущения о диффузионном характере горения.

На рисунке 1.3 представлена схема процессов горения частицы алюминия соответствующая данной модели.

$Al^c \rightarrow Al^g - Q_E$ – испарение алюминия со свободной поверхности

$2Al^g + \nu_{Ox,i} OX_i^g \rightarrow Al_2O_3^c + \nu_{P,i} P^g + Q_{2i}$ – реакции окисления алюминия на свободной поверхности

$2Al^g + \nu_{Ox,i} OX_i^g \rightarrow Al_2O_3^c + \nu_{P,i} P^g + Q_{2i}$ – реакции окисления паров алюминия на окисленной поверхности

$2Al^g + \nu_{Ox,i} OX_i^g \rightarrow Al_2O_3^c + \nu_{P,i} P^g + Q_{Vi}$ – реакции окисления паров алюминия в объеме потока.

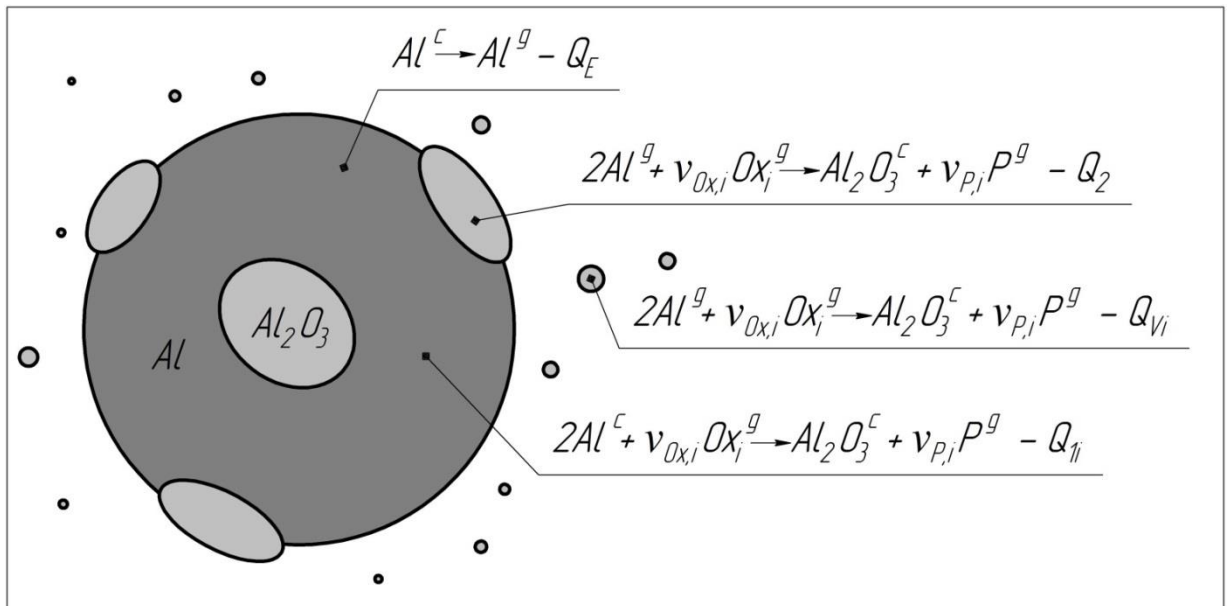


Рисунок 1.3 - Схема процесса горения частицы алюминия [32]

Здесь Ox – окислитель; P – продукты реакции; v – стехиометрический коэффициент реакции; Q – теплоты реакций и испарения; индекс c – относится к конденсированной фазе; g – газовой; E – испарению; Ox – окислительным компонентам; P – продуктам реакции; i – номер реакции; 1 – свободная поверхность; 2 – окисленная поверхность; V – процессы в объеме потока [32].

При плавлении оксид на поверхности собирается в образования, по форме близкие к сферическим из-за превышения поверхностного натяжения жидкого оксида над поверхностным натяжением алюминия. В результате обнажается поверхность жидкого алюминия, освобождённого от оксида. В целом поверхность частицы состоит из участков поверхности жидкого алюминия (свободная поверхность) и внешней поверхности оксида (окисленная поверхность). Предполагается, что окисление паров алюминия происходит не только в объёме вокруг частицы, но и непосредственно на внешней поверхности оксида. В результате химических реакций и испарения в частице происходит увеличение массы оксида и уменьшение массы алюминия. В результате действия поверхностных сил вновь образующийся на свободной поверхности оксид непрерывно с неё стекает и накапливается в

сферических образованиях, возникших в момент плавления оксида. Объём капель оксида постоянно растёт, и они сливаются в более крупные. Объём капли алюминия непрерывно уменьшается, в дальнейшем она разделяется на отдельные капли. Доля окисленной поверхности частицы увеличивается, а свободной – уменьшается. В конце процесса горения частица почти полностью состоит из оксида [32].

На основании анализа выполненных расчётов авторами [1, 32] сделан вывод, что предложенная модель хорошо описывает и объясняет экспериментальные зависимости времени горения частицы алюминия от её размера и основных параметров потока. Данная модель учитывает кинетику процессов на поверхности частицы, в объёме потока, температурную и скоростную неравновесность между частицами алюминия и потоком воздуха, а также образование субоксидов Al_2O и AlO .

1.2 Особенности горения аэрозвеси частиц алюминия

Первой особенностью порошкообразных металлов магния, алюминия, бора при их сжигании в активных газах (кислород, водяной пар, диоксид углерода, азот и их смеси) является образование конденсированных продуктов сгорания (оксидов, нитридов).

Процессы образования конденсированных продуктов могут происходить как в газовой фазе вокруг горящих частиц металла (газофазный или парофазный режим) так и на её поверхности [22].

Вторая важная особенность заключается в высокой химической активности рассматриваемых металлов (алюминий, магний, бор) [22, 33, 34, 35, 36, 37]. С кислородом воздуха металлы активно взаимодействуют уже при комнатной температуре [22, 34, 35]. Однако, несмотря на высокую активность металлов окислить их трудно даже при высокой температуре ($> 500\text{ K}$) в чистом кислороде и в мелко измельченном состоянии. При комнатной температуре, например, окисление алюминия прекращается

приблизительно через час. Такое поведение связано с первой особенностью металлов и обусловлено наличием на их поверхности плёнки оксидов, плохо проницаемой для газов.

Воспламенение одиночных частиц определяется условиями их прогрева в окружающей газофазной атмосфере до температуры воспламенения. Известно [22], что со слабой чувствительностью к влажности и концентрации окислителя в среде время воспламенения (τ_{en}) одиночных частиц Al практически не реагирует на степень активности окружающей атмосферы и, в частности, на наличие или отсутствие в среде чистого кислорода. Иное дело температура среды. Так же как и для капель жидких углеводородов и твердых частиц углерода, этот параметр является определяющим при воспламенении частиц алюминия. Прирост температуры окружающей среды с 2500 до 2900 К примерно в 2 раза облегчает воспламенение алюминия.

Этот результат вполне закономерен, поскольку величина периода индукции в первую очередь определяется прогревом частиц от начальной до критической температуры воспламенения. Основным видом теплообмена частицы с окружающей средой на данном этапе является теплопроводность в ламинарном пограничном слое (приведенной пленке) частицы. Поэтому скорость прогрева есть функция уровня температур среды и частицы и градиента dT/dR на границе среда-частица [22].

Время горения частиц алюминия τ_z и зависимость его от различных факторов, является весьма важным параметром с практической и теоретической точек зрения. В конечном итоге именно этот параметр определяет эффективность использования порошкообразного металлического горючего в камерах сгорания различных энергетических и технологических установок. Приближенная оценка взаимосвязи τ_z с размером частиц d показывает, что τ_z пропорционально диаметру в степени 1,7 – 2,0 [22].

Среда и давление оказывают непосредственное влияние на процесс горения мелкодисперсного алюминия. Процесс горения алюминия как диффузионный процесс активизируется по мере повышения активности среды, при увеличении концентрации кислорода или кислородсодержащих реагентов типа H_2O и CO_2 .

В выполненном в работе [22] теоретическом анализе парофазного горения частиц металлов было учтено влияние излучения из зоны пламени на горение металла и частичного испарения. Процесс горения одиночной частицы металла предполагается квазистационарным. Предложенный расчёт параметров горения частиц металлов с учётом частичной диффузии парообразных продуктов сгорания к поверхности металла по характеру основных зависимостей довольно точно отвечает экспериментальным результатам (рисунок 1.4).

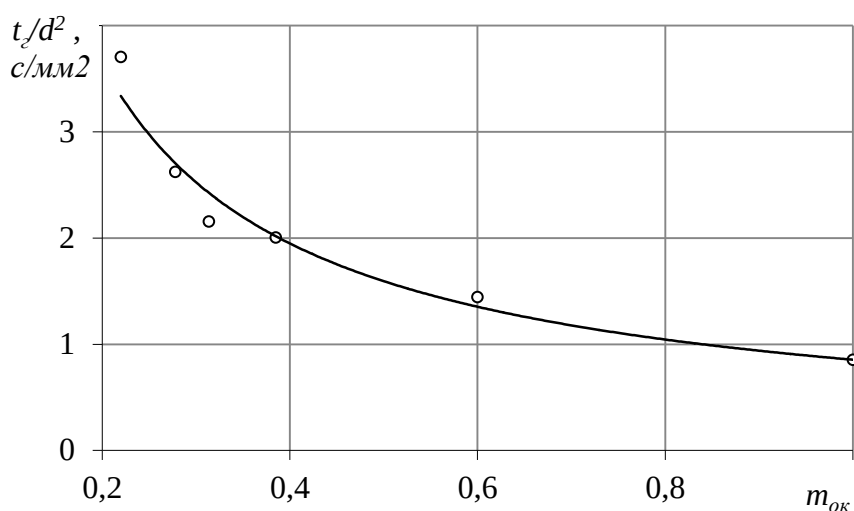


Рисунок 1.4 - Зависимость относительного времени горения частиц алюминия τ_c/d_0^2 от $m_{ок}$ [22]

● – эксперимент; линия - расчёт

Было отмечено, что в предложенном анализе [28] совершенно не обсуждается вопрос о характере и дальнейшей судьбе сконденсировавшейся на поверхности частицы парообразной окиси. Если предположить, что конденсация проходит равномерно на всей поверхности, то со временем

частица алюминия окажется заключенной оболочку из расплавленной окиси. Скорость испарения частицы постепенно будет замедляться и модель парофазного горения фактически перейдет в модель «пузырькового» горения. Для совокупности частиц теплоотвод от их поверхности, особенно если на ней имеет место дополнительный саморазогрев из-за реакции окисления, вызывает общее повышение температуры окружающей среды. В силу значительного теплового эффекта реакции горения большого количества алюминия, прогрев частиц определяется уже не только их теплообменом с окружающей средой, но и дополнительным теплоподводом из зоны горения. В результате этого скорость прогрева частиц возрастает, а время воспламенения уменьшается [22].

Повышенная горючесть металлических порошков обусловлена их большой химической активностью и высоким значением тепловыделения в химических реакциях (на единицу массы продуктов сгорания) [1]. Максимальное тепловыделение в горящих аэрозвесьях частиц металлов реализуется при низких коэффициентах избытка воздуха ($\alpha < 0,3$). Термодинамический анализ указывает на высокие температуры продуктов сгорания при низких значениях α , что согласуется с результатами термохимического анализа. Характерный эффект при низких коэффициентах избытка воздуха обусловлен специфической для металлов экзотермической реакцией азотирования.

Химический анализ продуктов сгорания алюминиево-воздушной смеси с низким значением коэффициента избытка воздуха показывает, что при $\alpha < 0,3$ резко возрастает как доля нитрида алюминия [23, 38, 39], в продуктах сгорания, так и отличие измеренной температуры от термодинамической (рассчитанной с учётом реакции алюминия только с кислородом).

Влияние коэффициента избытка воздуха на тепловыделение и термодинамическую температуру различных металлов и углеводородного горючего представлено на рисунке 1.5

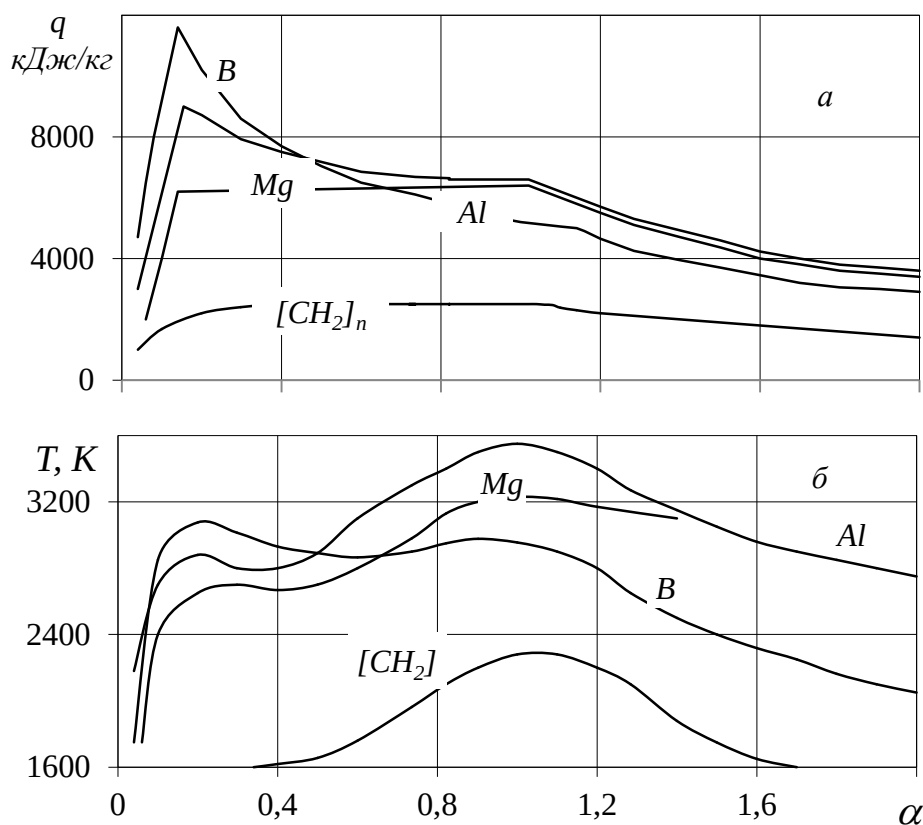


Рисунок 1.5 - Влияние коэффициента избытка воздуха на тепловыделение (а) и термодинамическую температуру (б) [1]

В [23] показано, что в сильно переобогащённых металловоздушных смесях при распространении пламени происходит автотурбулизация потока, которая приводит к искривлению фронта пламени и увеличению его скорости. При низких значениях коэффициента избытка воздуха скорость распространения пламени в аэрозвесьях частиц алюминия увеличивается, а при составах смеси близком к стехиометрическому U_f уменьшается. Смещение максимума функции $U_f(\alpha)$ в сторону низких значений α объясняется экзотермической реакцией азотирования металлов и особенностями процессов тепло-массообмена в богатых металловоздушных смесях [40]. Сопровождаемый экзотермическим эффектом процесс образования нитрида алюминия (AlN_K) вносит существенный вклад в суммарное тепловыделение и поддерживает устойчивое воспламенение и горение, обедненной кислородом смеси.

По мнению автора [1], одной из причин смещения α в область $\ll 1$ является автотурбулизация потока, которая возникает из-за переобогащения смеси. Чем больше переобогащение смеси, тем сильнее автотурбулизация потока.

Зависимость скорости распространения фронта пламени U_f в аэровзвеси частиц алюминия от коэффициента избытка воздуха полученная в работе [41], представлена на рисунке 1.6. Для сравнения на этом же рисунке отображена аналогичная зависимость для аэровзвеси капель углеводородного горючего [42].

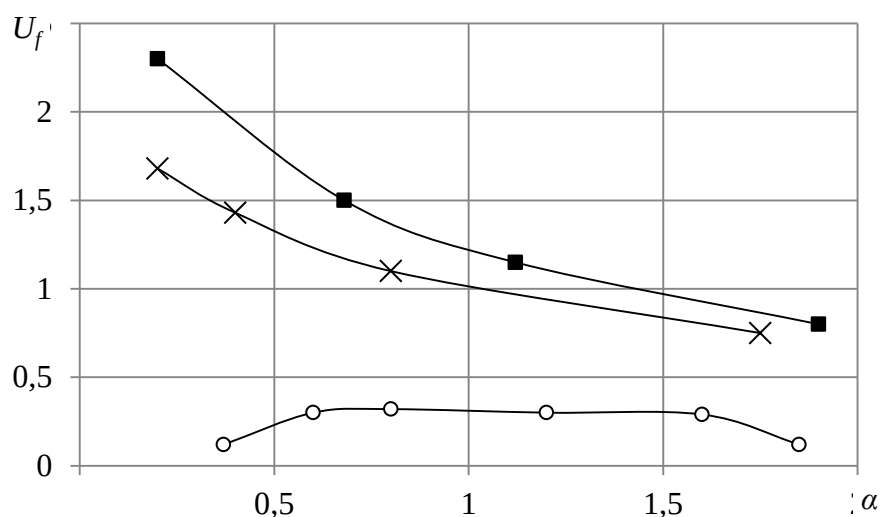


Рисунок 1.6 - Влияние коэффициента избытка воздуха α на скорость распространение пламени [41, 42]

$$p = 0,1 \text{ МПа}, T_0 = 300^0 \text{ К}$$

■ - аэровзвесь частиц алюминия; ○ - углеводородное горючее; × - аэровзвесь частиц магния

Подобные зависимости, полученные в [43] для аэровзвеси порошков алюминия марок АСД-1 ($d_{32} = 17,4$ мкм) и АСД-4 ($d_{32} = 7,4$ мкм), представлены на рисунке 1.7.

В [1, 41, 43] установлено, что важной особенностью, выявленной в экспериментах, является возрастание скорости распространения пламени в

аэровзвесьях порошков алюминия по мере уменьшения коэффициента избытка воздуха до значений $\alpha = 0,1 \dots 0,15$ (см. рисунок 1.6 и 1,7), что соответствует максимальным значениям тепловыделения и температуры (см. рисунок 1.5).

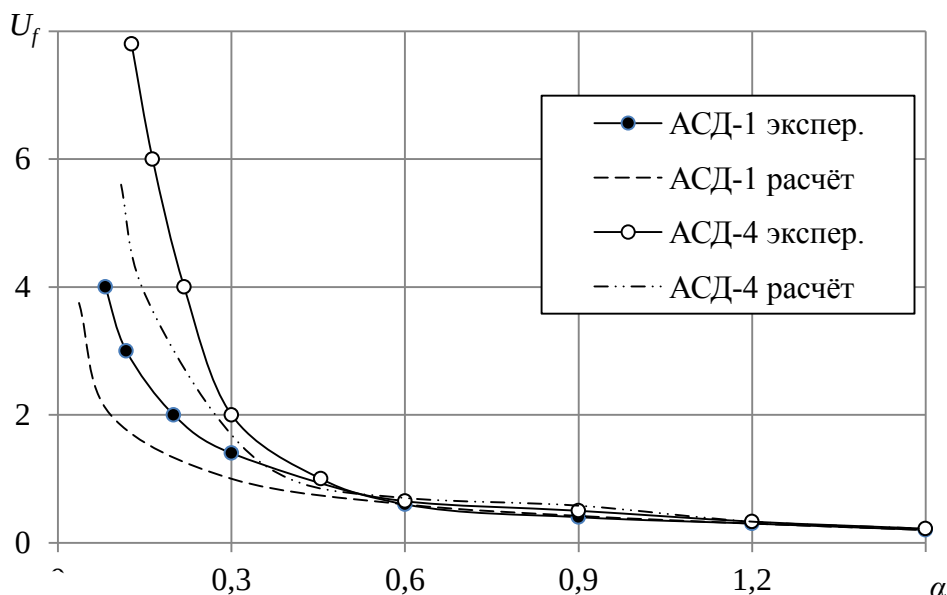


Рисунок 1.7-Влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени по аэровзвесьям порошков алюминия АСД-1 и АСД-4 [43]

$$p = 0,1 \text{ МПа}, T_0 = 300^0 \text{ К}$$

Как видно из рисунков 1.6 - 1.7 уменьшение скорости распространения пламени в аэровзвесьях частиц алюминия с увеличением α , не согласуется с ростом температуры и тепловыделения, которые принимают максимальные значения при $\alpha \approx 1$, полученные термодинамическими расчетами и представленные на рисунке 1.5.

Выявленные на рисунках 1.5, 1.6 и 1.7 противоречия, говорят о том, что необходимы более детальные исследования горения алюминиево-воздушных смесей в диапазоне изменения значения коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 1$. Так же в [1] отмечается, что организация первичного горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 1$ в силу высокой скорости и низкой

температуре первичного потока не позволит стабилизировать фронт пламени, поскольку время пребывания τ_{np} частиц алюминия в камере сгорания меньше времени воспламенения $\tau_{вн}$.

Для подтверждения или опровержения высказанного предположения необходимо получить экспериментальные данные по стабилизации фронта пламени в потоках аэрозвеси частиц алюминия стехиометрических составов $\alpha \approx 1$.

1.3 Влияние параметров процесса горения аэрозвеси на характеристики продуктов сгорания

Как выше было отмечено, процесс образования конденсированных продуктов может происходить вокруг горящих частиц в газовой фазе и на поверхности самой частицы алюминия. Образование слоя оксидов (нитридов) на поверхности частицы оказывает влияние на подвод реагентов к зоне реакции и на скорость горения.

Влияния конденсированной фазы на процесс горения в значительной степени зависит от дисперсности конденсированных продуктов сгорания. Подавляющая доля твёрдых конечных продуктов сгорания представляет собой сферические частицы размером порядка 1 мкм и менее. Наряду с ними имеется некоторое количество более крупных сплошных сфер, а также определённое количество полых сфер, которые по размерам превосходят исходную частицу алюминия [22]. По мнению авторов [44] дисперсные оксиды размером <10 мкм образуются в результате газофазных реакций в объёме вокруг горящих частиц алюминия. Частицы оксида алюминия размером > 10 мкм соответствуют по своим размерам исходным частицам порошка алюминия и представляют собой скопления оксида на поверхности частицы алюминия.

Экспериментально в [24] было установлено, что при определенных условиях сжигания ламинарных струй газовзвесей, могут быть получены конденсированные продукты сгорания частиц металлов.

Таковыми условиями являются:

1. Высокотемпературный паро- или газофазный режим сгорания частиц металлов, что обеспечивает наличие газообразных продуктов сгорания, большие градиенты температуры вокруг частиц и наиболее вероятный механизм образования нанодисперсной к-фазы – химическую конденсацию.

2. Ламинарная газодинамика факела: в отличие от турбулентной она не способствует агломерации частиц и обеспечивает идентичность условий по градиентам температуры и концентраций газовых компонентов в среде для всех горящих частиц.

3. Для получения узких распределений частиц оксидов по размерам, в качестве исходных следует применять порошки металлов с размерами частиц менее 15 – 20 мкм. Этим обеспечивается практически полное увлечение частиц потоком, снижается влияние конвективных течений, что способствует образованию симметричных полей температуры и концентрации вокруг горящих частиц.

При выполнении этих условий продуктами факельного сгорания взвесей частиц металлов являются химически чистые, хорошо дезагрегированные гранулометрические, узкие порошки оксидных частиц сферической формы с размерами от 10 до 100 нм (рисунок 1.8).

Анализ дисперсности продуктов горения показал, что не менее 90% всей массы пробы (при $\alpha \cong 1$) составляют сферические частицы оксида алюминия диаметром менее 0,1 мкм.

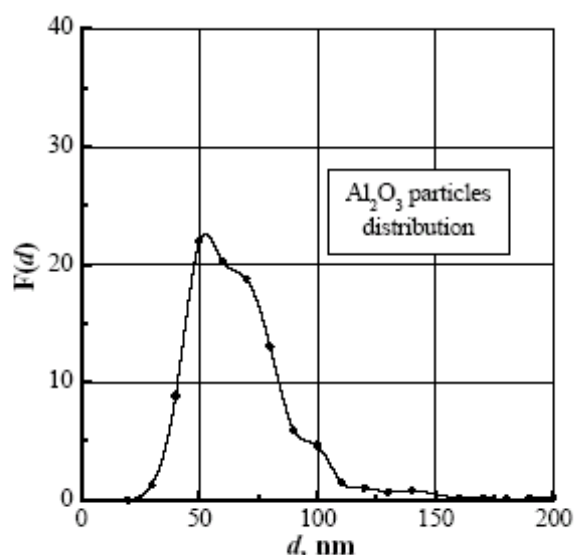
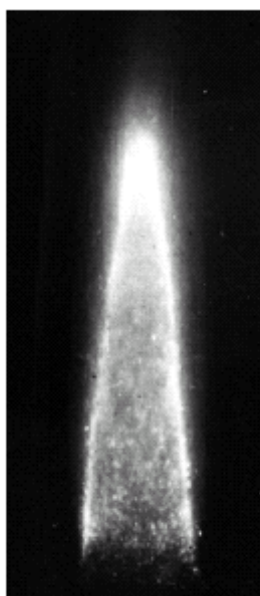


Рисунок 1.8 - Ламинарный диффузионный двухфазный факел
и распределение наночастиц Al_2O_3 по размерам [24]

В [1] представлены результаты испытаний экспериментальной установки для получения нанопорошков оксидов алюминия с отбором конденсированной фазы из потока продуктов сгорания. Внутрикамерные параметры в экспериментах, в которых были получены продукты для анализа, имели следующие значения: давление в камере сгорания $p_c = 0,25$ МПа, коэффициент избытка воздуха в форкамере $\alpha_1 = 0,11$, коэффициент избытка воздуха в основной камере сгорания $\alpha_2 = 2,5$, температура сгорания $T_c = 2400$ К.

В результате испытаний установки была получена опытная партия порошка γ -оксида алюминия, пробы которого подвергли анализу с определением химического, фазового и дисперсного состава. Результаты дисперсного анализа конденсированных продуктов, полученных при сжигании аэрозвеси порошка АСД-4 в установке, приведены на рисунке 1.9 (кривые построены в логарифмическом масштабе).

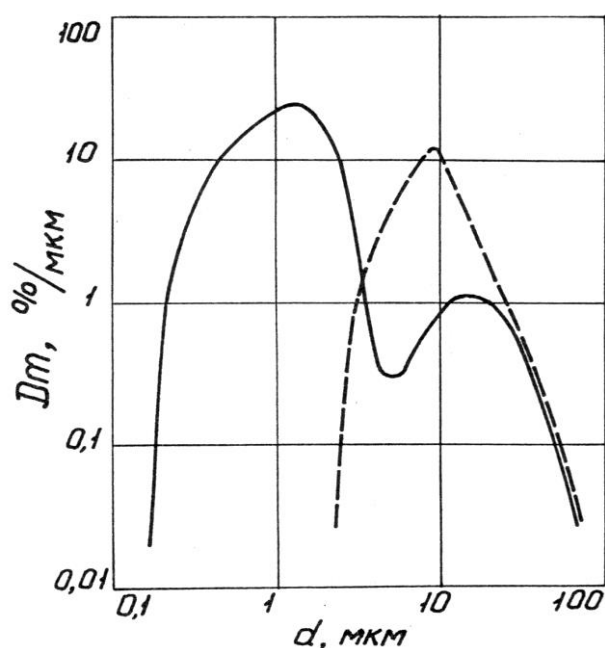


Рисунок 1.9 - Дифференциальное распределение массы частиц по размерам:

— продуктов сгорания, - - - исходного алюминия (АСД-4) [1]

Главной особенностью полученной кривой является ее двуmodalность обусловленная различным механизмом образования оксидов.

Было установлено, что основную массу пробы продуктов сгорания (76 %) составляют высокодисперсные частицы (левая мода) с размером менее 4 мкм и максимумом плотности распределения массы в интервале 1 .. 2 мкм. Частицы правой моды распределения соответствуют по своим размерам исходным частицам алюминия. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что левая мода представляет собой высокотемпературную γ -модификацию Al_2O_3 , а правая – α -модификацию Al_2O_3 с примесями несгоревших частиц алюминия. В целом, результаты дисперсного и рентгеноструктурного анализа, так же как и в [45] доказывают одно из допущений, положенных Малининым В.И. в основу математической модели, описывающей процесс горения частиц алюминия: крупнодисперсный оксид образуется при гетерогенном окислении частиц, а ультрадисперсный – при газофазном окислении паров алюминия.

На рисунке 1.10 представлен график распределения по размерам частиц

Al_2O_3 , полученного методом сжигания порошка алюминия в потоке воздуха [46]. Как видно, хотя имеется широкое распределение по размерам частиц Al_2O_3 , максимум распределения приходится на размер 100 нм, а наибольший размер частиц не превышает 300 нм.

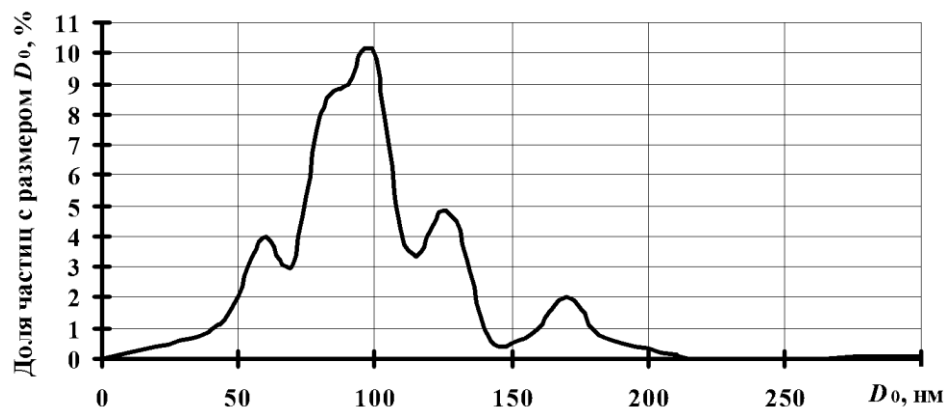


Рисунок 1.10 - Дифференциальное распределение по размерам массы частиц Al_2O_3 [46]

На образование оксида алюминия в объёме вокруг горячей частицы существенное влияние оказывает давление в камере сгорания, при котором происходит горение порошка. Представленный на рисунке 1.11 график отображает зависимость доли ультрадисперсного оксида алюминия от давления в камере сгорания [49].

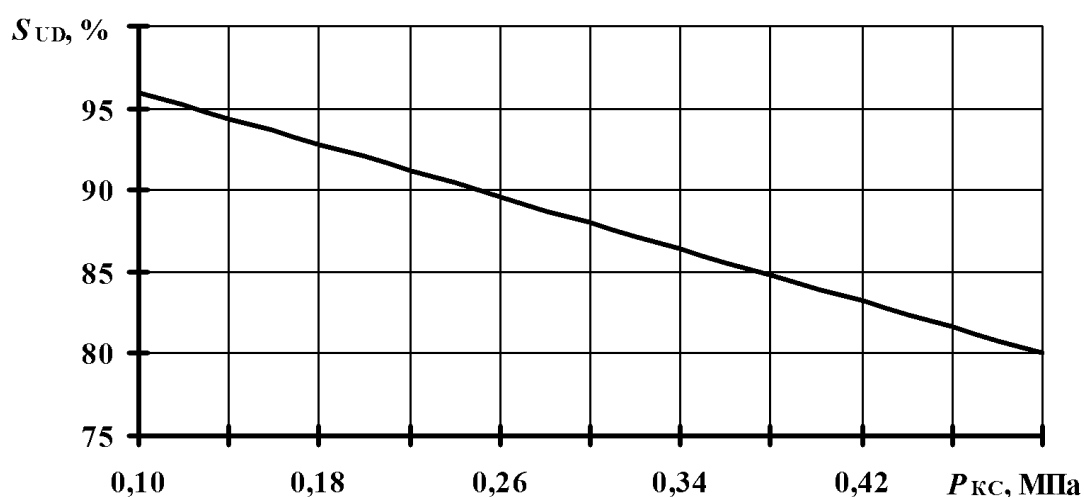


Рисунок 1.11 - Зависимость доли ультрадисперсного оксида алюминия S_{UD} в продуктах горения от давления в камере сгорания $p_{КС}$ [49].

Из рисунка видно, что доля ультрадисперсного оксида алюминия S_{UD} в продуктах горения будет максимальной при давлении $p_{КС} = 0,1$ МПа. Следовательно, давление в камере установки должно быть не более 0,1 МПа. Это один из параметров, посредством которого можно увеличить долю ультрадисперсного Al_2O_3 и тем самым увеличить полноту сгорания.

Численное моделирование воспламенения и горения аэрозвеси порошка АСД-4 позволило исследовать динамику образования ультрадисперсного оксида. Варьирование параметров, показало возможность существенного уменьшения доли образующегося при горении крупнодисперсного оксида и максимального увеличения доли ультрадисперсного [1].

Испытания экспериментальной установки показали: изменяя условия смешения воспламенившейся аэрозвеси алюминия и вторичного воздуха в камере сгорания, можно влиять на механизм горения частиц алюминия (парофазный или гетерогенный) и тем самым изменять дисперсность конечного продукта в широких пределах.

На рисунке 1.12 представлена зависимость доли ультрадисперсного оксида σ от коэффициента α в камере сгорания, полученная по исследованиям [1]. Таким образом, из рисунка видно, что коэффициент избытка воздуха $\alpha \approx 2$ в основной камере сгорания, соответствует максимальной доле ультрадисперсного оксида в продуктах сгорания.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что подвод воздуха в камере сгорания с критической скоростью обеспечивает полноту сгорания порошка АСД-4 при рабочем давлении (около 0,2÷0,25 МПа) не менее 95% (рисунок 1.13). При докритической скорости подвода, полнота сгорания в 1,5÷2 раза меньше.

На основании зависимостей, представленных на рисунке 1.16 можно сделать вывод, что в качестве энергоносителя в двигательных и исходного сырья в технологических установках необходимо применять порошок АСД-4, поскольку в довольно широком диапазоне изменения давления в камере

полнота сгорания этого порошка почти вдвое выше, чем полнота сгорания порошка АСД-1.

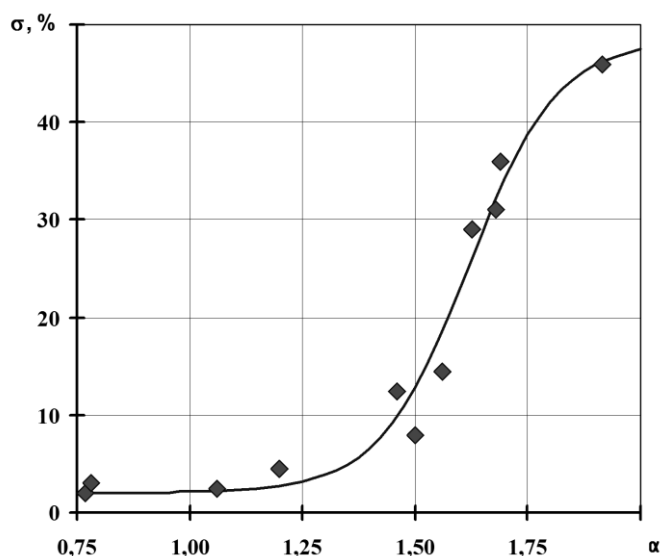


Рисунок 1.12 - Зависимость доли ультрадисперсного оксида в продуктах сгорания от коэффициента α [1]

Это связано с тем, что средний размер частиц порошка АСД-1 составляет 17,4 мкм, тогда как для частиц порошка АСД-4 он равен 7,4 мкм [50]; тепловые и диффузионные потоки в системе обратно пропорциональны размеру сгорающей частицы, а время сгорания пропорционально размеру сгорающей частицы в степени 1,5÷2 [22, 51].

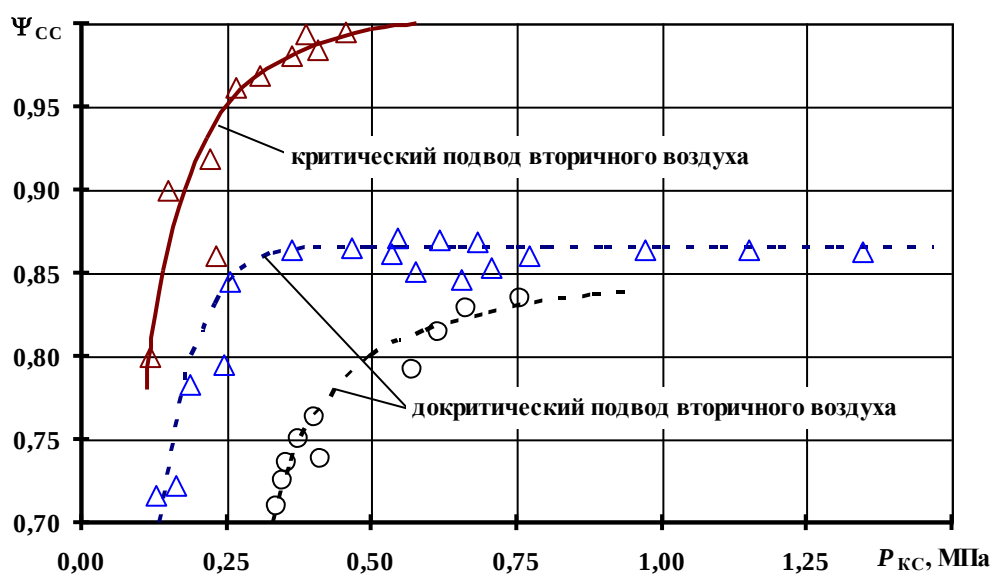


Рисунок 1.13 - Зависимость коэффициента полноты сгорания порошков алюминия от давления: $\circ$ – АСД-1, Δ – АСД-4 [1]

Вместе с тем необходимо отметить, что повысить полноту сгорания аэровзвеси частиц алюминия, можно также за счет увеличения времени пребывания частиц Al в камере сгорания (τ_{np}).

На морфологический состав продуктов сгорания оказывает влияние скорость набегающего потока аэровзвеси. Было установлено [52], что сжигание аэровзвеси частиц алюминия со сверхзвуковыми скоростями приводит к широкому разбросу продуктов сгорания по размерам; необходимости обеспечения высоких давлений в камере сгорания; недостаточной полноте сгорания исходных частиц алюминия.

1.4 Схемы организации рабочего процесса в двигательных и технологических установках

В теоретических работах А.Я. Лукина, А.М. Степанова [52, 53] и экспериментальных Л.Н. Стесика с сотрудниками [54] показано, что средний размер частиц левой моды пропорционален давлению $p^{1/3}$ и температуре газа T_g . Варьируя, давлением и температурой газа в широких пределах они показали, что возможно значительно изменять размеры получаемых частиц оксида алюминия.

С использованием указанных экспериментальных и теоретических предпосылок в работе [20] была обоснована возможность применения внутрикамерных рабочих процессов энергетической установки на порошкообразном металлическом горючем для получения нанопорошков Al_2O_3 . Экспериментальная установка с прямоточной камерой сгорания разработанной в ОКТБ «ТЕМП» при Пермском государственном техническом университете представлена на рисунке 1.14.

Поток аэровзвеси частиц алюминия в форкамере установки синтеза зажигался струей высокотемпературных продуктов сгорания воспламенителя. В качестве воспламеняющего состава использовался заряд смесового топлива.

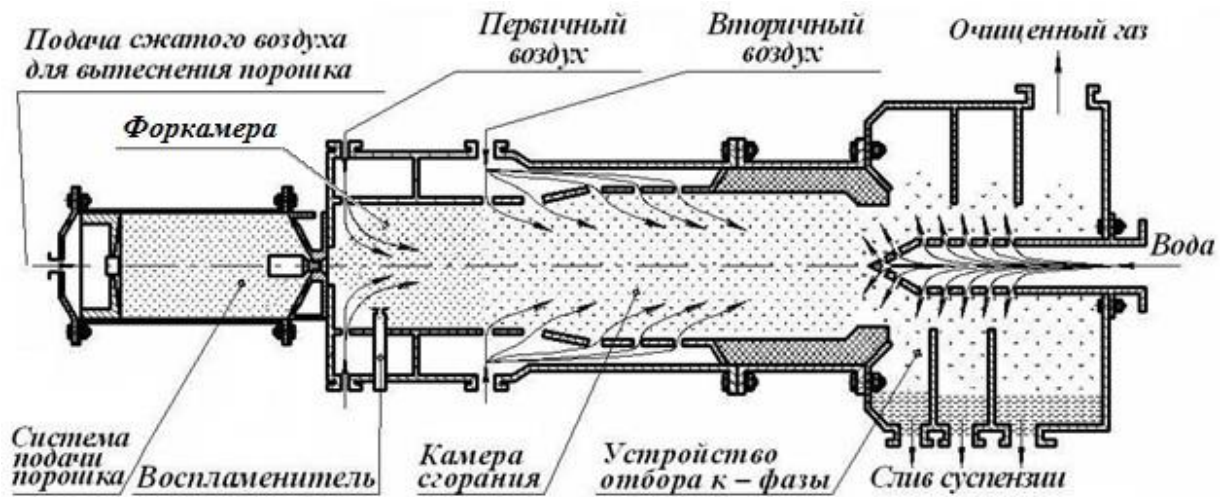


Рисунок 1.14 - Схема экспериментальной установки
с прямоточной камерой сгорания [4]

Варьированием поверхности горения заряда и его формы в широких пределах изменялись расход воспламенителя (более чем в 10 раз) и соответственно его тепловая мощность. Продукты сгорания с температурой более 3000 К истекали из воспламенителя (как в критическом, так и в докритическом режиме) перпендикулярно первичному алюминиево-воздушному потоку. Факт зажигания смеси, распространение пламени и устойчивое горение устанавливались по характеру изменения давления в камере сгорания p_c .

В исследованиях использовались порошки алюминия промышленных марок АСД-1 ($d_{32} = 17,4$ мкм) и АСД-4 ($d_{32} = 7,4$ мкм). Оказалось, что энтальпия воспламенения АСД-4 в интервале значений $p_{c1} = 0,15 \div 0,4$ МПа, $\alpha_1 = 0,04 \div 0,30$; $U_{01} = 5 \div 20$ м/с практически не зависит от давления и начальной скорости потока. Определяющее влияние на процессы воспламенения аэровзвеси оказывает дисперсность алюминиевого порошка и режим истечения зажигающего газа, более слабое — коэффициент избытка воздуха.

Определялась зависимость минимального значения удельной энтальпии I_{ign} , необходимой для воспламенения аэровзвеси порошков алюминия от основных параметров первичного потока (рисунок 1.15) [1].

Полученные данные показали, что энтальпия воспламенения аэровзвеси порошка АСД-4 не может обеспечить одновременное зажигание всей взвеси, так как средняя температура взвеси ($< 1000^0\text{K}$) ниже температуры воспламенения ($\geq 1000^0\text{K}$) [55]. Очевидно, при воспламенении сначала образуется очаг пламени, от которого пламя распространяется на весь поток.

Зажигание аэровзвеси порошка АСД-1 идет по другому механизму. Нормальная скорость пламени во взвеси АСД-1 намного меньше, чем в АСД-4 [43, 56], поэтому пламя из отдельных очагов за время пребывания в форкамере не успевает распространиться на весь объем.

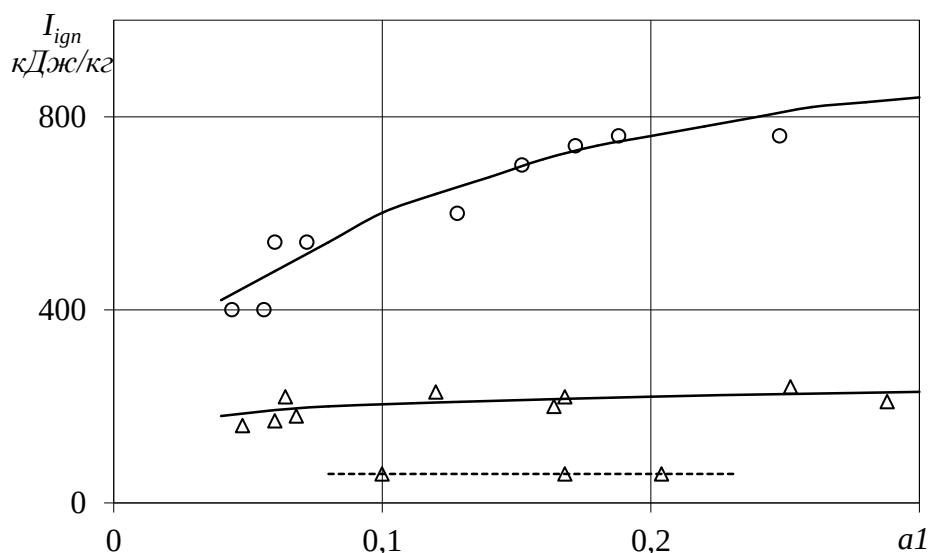


Рисунок 1.15 – Зависимости I_{ign} от коэффициента избытка воздуха α [1]

○ – АСД-1, Δ – АСД-4; — критическое,

----- докритическое истечение зажигающего газа;

$$p_{c1} = 0,15 \div 0,3 \text{ МПа}; U_{01} = 5 \div 25 \text{ м/с (АСД-1)}, 5 \div 50 \text{ (АСД-4)}$$

Очаги пламени, которые не гаснут в форкамере, попадают в камеру сгорания, где скорость потока на порядок выше и тем более нет условий для воспламенения смеси.

В данном случае зажигание происходит только при таком значении энтальпии воспламенения, при котором практически во всём объёме, а не в

отдельных очагах выполняется условие воспламенения смеси. При этом температура окружающей среды в аэровзвеси достигает таких значений, которые превышают критическую температуру воспламенения мелких частиц алюминия. Мелкие частицы, воспламенившись, сгорают и посредством теплообмена нагревают до воспламенения соседние крупные частицы, тем самым воспламеняя всю смесь.

Стабилизация фронта пламени в форкамере реализовывалась методом аэродинамической стабилизации, посредством поперечного вдува встречных струй воздуха. Надежная стабилизация фронта пламени алюминиево-воздушного потока в рабочем объеме форкамеры осуществлялась при следующих параметрах первичного потока алюминиево-воздушной смеси: давления $p = 0,1 \div 1,5 \text{ МПа}$; среднеобъемной скорости холодного потока воздуха $U_{01} = 1 \div 12 \text{ м/с}$ (АСД-1), $1 \div 40$ (АСД-4); коэффициента избытка воздуха $\alpha_1 = 0,04 \div 0,30$.

По результатам испытаний в координатах $\alpha_1 - V_{0,1}$ были построены области стабилизации пламени в первичном потоке аэровзвеси порошков АСД-1 и АСД-4 (рисунок 1.16).

Достаточно строго была определена граница области устойчивого горения только для порошка АСД-1. Для АСД-4 граница устойчивого зажигания строго не определена, так как в испытаниях не удалось получить срыва пламени. Из анализа рисунка 1.18 следует, что пламя устойчиво существует в аэровзвеси порошков АСД-1 и АСД-4 вплоть до значения $\alpha = 0,04$. Для АСД-1 зависимость $U_{01}(\alpha)$ имеет максимум в интервале значений $\alpha = 0,08 \div 0,12$. Изменение давления в форкамере в интервале $p_{c1} = 0,1 \div 0,3 \text{ МПа}$ не оказывало существенного влияния на скорость срыва пламени [1].

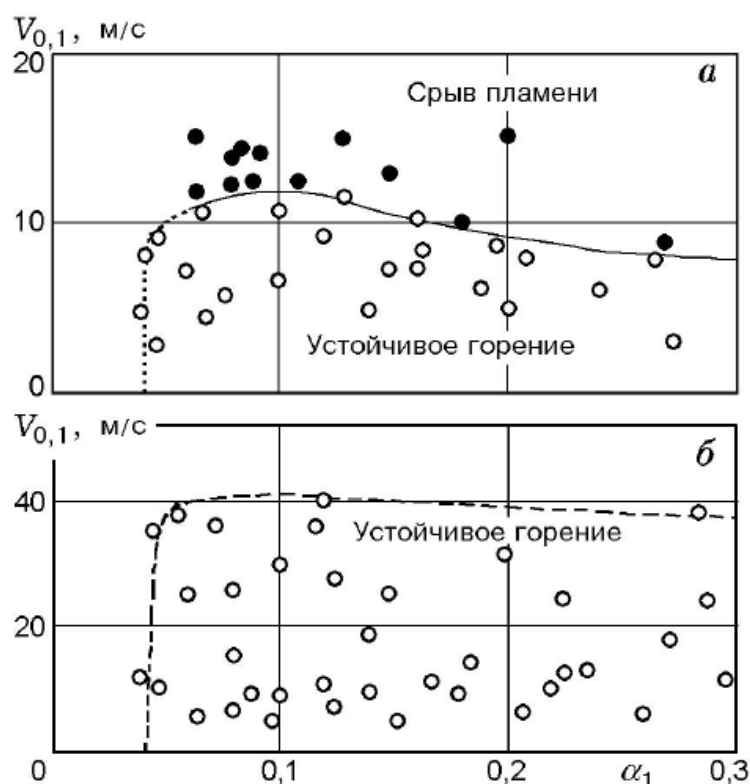


Рисунок 1.16 - Области устойчивого горения порошков АСД-1 (а) и АСД-4 (б); $p = 0,1 \div 0,3$ МПа, $T_0 = 290$ К [1]

В работе [23] рассмотрена возможность стабилизации фронта пламени потока аэровзвеси перфорированными пластинами с сотовым расположением отверстий, а также и с одним центральным отверстием (рисунок 1.17).

Было установлено, что увеличение скорости аэровзвеси U_0 перед пластиной приводит к вытягиванию микрофронтов пламени. При значениях U_0 , близких к критическим, существенно возрастает неоднородность потока, которая характеризуется образованием вихревых зон, расположенных в непосредственной близости от турбулизатора и у стенок камеры. При этом уровень температур продуктов сгорания снижается на $150 \div 200^\circ$, что связано с уменьшением времени пребывания частиц алюминия в рабочей зоне камеры сгорания. Аналогичный результат получен и при уменьшении коэффициента избытка окислителя α . В этом случае также происходит увеличение характерных осевых масштабов и снижение температуры.

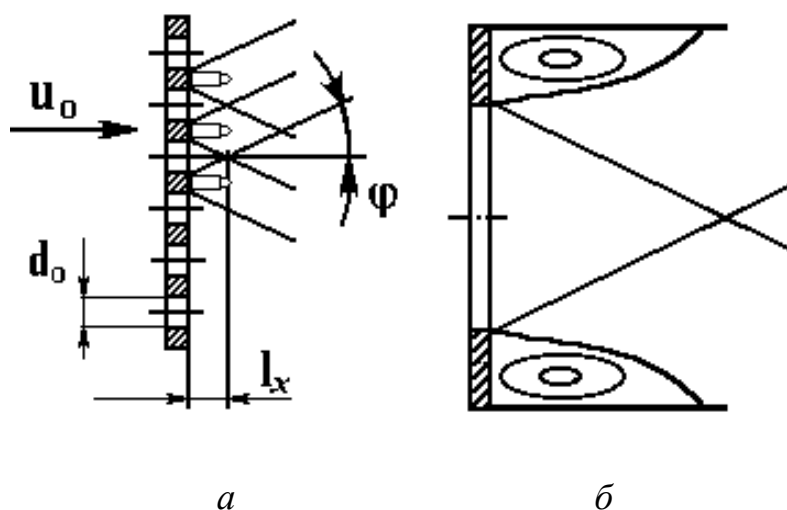


Рисунок 1.17 - Схема стабилизации пламени перфорированными пластинами:
а – сотовое расположение отверстий; *б* - центральное отверстие [23]

В исследованиях [23] в качестве основного определяемого параметра была принята скорость турбулентного горения аэровзвеси, оцениваемая по критическому значению скорости потока U_0 , выше которого происходит срыв пламени. Во всех экспериментах после воспламенения алюминиево-воздушной смеси система зажигания отключалась. Результаты измерения величины U_0 характеризуют обратно пропорциональную зависимость скорости пламени от коэффициента живого сечения перфорированных пластин.

Было установлено, что для пластин с центральным отверстием наблюдается превышение значений U_{cr} на $10 \div 15$ м/с над значениями U_{cr} для перфорированной пластины с сотовым расположением отверстий при прочих равных условиях. Это объясняется тем, что объём зоны обратных токов в этом случае больше и устойчивое воспламенение порошкообразного алюминия реализуется в более широком диапазоне скоростей.

В [17] представлен вариант организации рабочего процесса в прямоточной камере сгорания со стабилизацией фронта пламени посредством плохобтекаемого тела.

На рисунке 1.18 представлена принципиальная схема установки.

Рабочий участок выполнен в виде конструкции квадратного поперечного сечения $62 \times 62 \text{ мм}^2$ со сменной прозрачной передней стенкой. С целью снижения гидравлических потерь обеспечивается равенство площадей поперечных сечений рабочего участка и цилиндрической камеры 11 диаметром 70 мм. Воспламенение аэрозвеси частиц алюминия осуществлялось электроискровым способом с использованием катушки зажигания мощностью 100Вт.

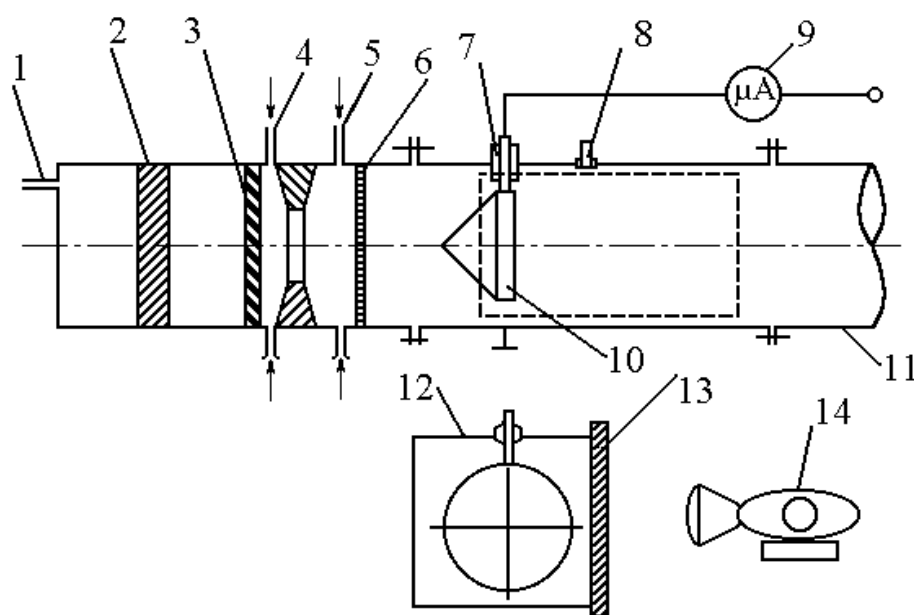


Рисунок 1.18 - Схема модельной установки [17]

1, 4, 5 – штуцеры; 2 – поршень; 3 – решётка; 6 – перфорированная пластина; 7 – керамический изолятор; 8 – электрическая свеча; 9 – микроамперметр; 10 – конический стабилизатор; 11 – цилиндрическая камера; 12 – рабочий участок; 13 – сменная передняя стенка конструкции; 14 – кинокамера

Фронт пламени стабилизировался за плохообтекаемым телом – прямым конусом 10 с углом при вершине 90° и диаметром основания 40 мм (степень загромождения поперечного сечения составляла 34%).

В качестве основного регистрируемого параметра была принята скорость турбулентного горения аэрозвеси U_f , которая оценивалась по

критическому значению скорости U_0 , потока перед стабилизатором: если скорость турбулентного горения аэровзвеси частиц алюминия U_f , превышала U_0 , то процессы воспламенения и горения были устойчивы (фронт пламени стабилизировался), в противном случае происходил срыв пламени и рабочий процесс прекращался. Этот режим соответствует неустойчивому рабочему процессу или неустановившемуся пламени.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 1.19.

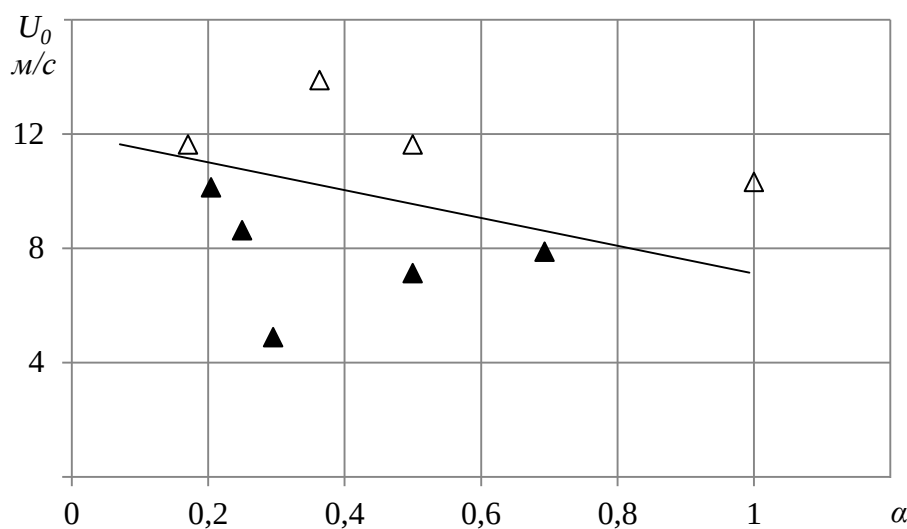


Рисунок 1.19 – Зависимость критической скорости срыва пламени U_0 от коэффициента избытка воздуха α [17]

В [17] авторами сделано предположение, что характерной особенностью стабилизации потока аэровзвеси частиц алюминия является слабая зависимость U_0 от коэффициента избытка воздуха, что свидетельствует о превалирующем влиянии гидродинамических параметров потока на характеристики турбулентного горения аэровзвеси.

Подводя итоги полученных результатов, они сделали вывод о том, что положительный результат, получен в условиях развитого турбулентного течения и может служить основой для разработки практических рекомендаций по организации процессов воспламенения и горения

аэровзвеси частиц алюминия не только в лабораторных условиях, но и в камерах сгорания энергетических установок.

В [57, 58, 59] исследован процесс стабилизации пламени в высокоскоростном турбулентном потоке аэровзвеси частиц алюминия с помощью зоны рециркуляции, возникающей при внезапном расширении осесимметричного канала (камера сгорания с внезапным расширением). Схема стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в камере сгорания с внезапным расширением представлена на рисунке 1.20.

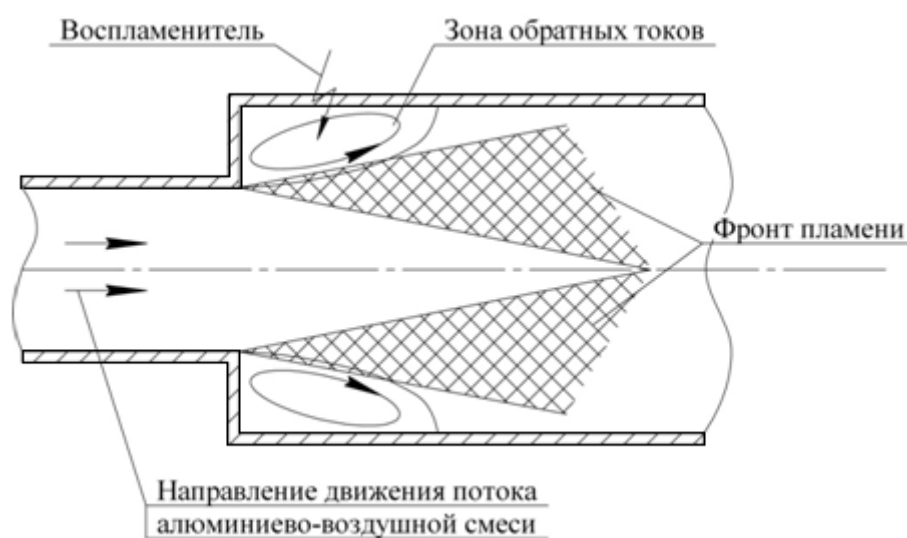


Рисунок 1.20- Схема стабилизации фронта пламени [59]

В указанных работах представлены экспериментальные данные о влиянии степени внезапного расширения канала, размера, формы и химического состава частиц, тепловых потерь, начальной температуры и турбулентности набегающего потока на границы устойчивого горения.

Результаты испытаний [57-59], не подтвердили предположение авторов [17] о слабой зависимости скорости срыва от коэффициента избытка воздуха α , и превалирующем влиянии гидродинамических параметров потока на характеристики турбулентного горения аэровзвеси частиц алюминия. На рисунке 1.21 представлена зависимость $U_{cr}(\alpha)$ [59]. На рисунке видно, что в

области $\alpha \approx 0,2$ имеется ярко выраженный максимум и зависимость $U_{cp}(\alpha)$ не является линейной, как это показано на рисунке 1.19.

В [57-59] было установлено, что основными параметрами, определяющими процесс стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия, являются: размеры зоны рециркуляции, температура в ней и интенсивность процессов тепло- и массообмена зоны рециркуляции с основным потоком алюминиево-воздушной смеси.

Стабильность горения свежей алюминиево-воздушной смеси, поступающей в камеру, достигается непрерывным поджиганием ее в определенном месте в слое смешения в пределах длины зоны рециркуляции.

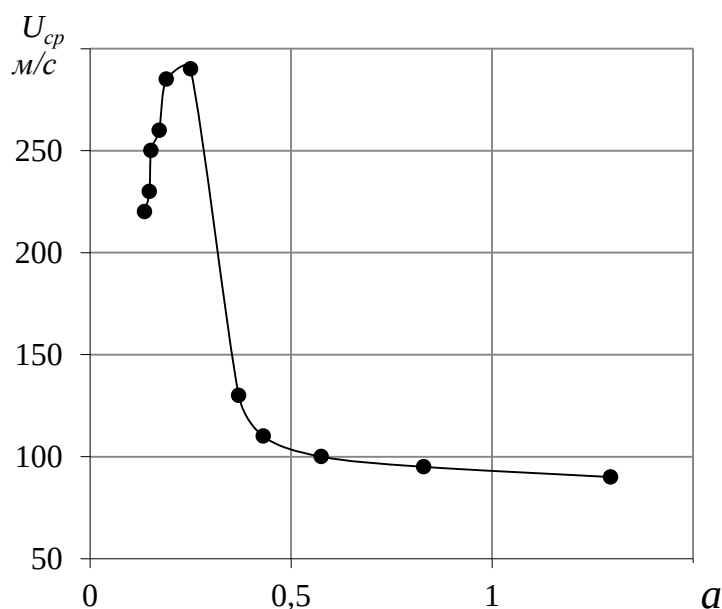


Рисунок 1.21 - Зависимость $U_{cp}(\alpha)$ [59]

При движении частицы Al по линии тока «определяющей цилиндрической поверхности» ее место поджигания будет характеризоваться временем воспламенения τ_e , прошедшее после попадания частицы в камеру сгорания. Поэтому условия стабилизации должны также оцениваться и по возможности распространения пламени в основной поток аэровзвеси.

Таким образом, при организации рабочего процесса в камерах сгорания двигательных и технологических установок, стабилизацию фронта пламени в

турбулентном потоке аэровзвеси частиц алюминия можно обеспечить с помощью гидродинамической рециркуляции, формируя тем, или иным способом зону рециркуляции.

1.5 Анализ литературного обзора и постановка задач исследования

Проведённый анализ показал, что из рассмотренных моделей горения аэровзвеси частиц алюминия в высокоскоростном потоке воздуха, наибольшее соответствие с экспериментальными результатами, имеет модель, представленная в [32]. Данная модель, учитывает кинетику процессов на поверхности частицы, в объёме потока, а также температурную и скоростную неравновесность между частицами алюминия и потоком воздуха. На основании данной модели в [1] исследована энтальпия воспламенения аэровзвеси порошка алюминия. Установлено, что энтальпия воспламенения порошка алюминия не может обеспечить одновременное зажигание всей смеси, вначале образуется начальный очаг зажигания, от которого пламя распространяется в основной поток алюминиево-воздушной смеси.

Вместе с тем необходимо отметить, что отсутствие в настоящее время данных о закономерности развития начального очага зажигания в потоке алюминиево-воздушной смеси, не позволяет определить критические условия воспламенения смеси. В связи с этим необходимо провести исследования направленные на определение критического диаметра начального очага зажигания и выявления динамики развития очага в зависимости от параметров потока аэровзвеси частиц алюминия (размера частиц, турбулентности и т.д.).

Термодинамический анализ горения металлов в воздухе (рисунок 1.5 б) указывает на увеличении температуры продуктов сгорания при значениях $\alpha < 0,3$ и $\alpha \approx 1,0$ что согласуется с результатами термохимического анализа [1]. Поэтому экспериментальные данные должны соответствовать

теоретическим представлениям, согласно которым в алюминиево-воздушных смесях при $\alpha \approx 1,0$ тепловыделение, температура и скорость распространения пламени принимают максимальные значения.

На рисунке 1.5 представлено наличие двух максимумов на расчетных кривых тепловыделения и температуры при горении аэровзвеси частиц алюминия. Первый максимум значений тепловыделения и температуры на рисунке 1.5 при составе смеси $\alpha < 0,3$, соответствует максимальному значению скорости срыва пламени, представленному на рисунке 1.21, а следовательно и максимальным значениям скорости распространения пламени. Вместе с тем на рисунке 1.5 второй максимум по тепловыделению и температуре при стехиометрическом составе смеси $\alpha \approx 1,0$ не отмечен ростом значений скорости срыва пламени на рисунке 1.21 и увеличением скорости распространения пламени на рисунках 1.6 и 1.7.

В связи с этим необходимы дальнейшие исследования по определению скорости распространения фронта пламени в потоках аэровзвесей частиц алюминия стехиометрических ($\alpha \approx 1,0$) и обеднённых ($\alpha > 1,0$) составах смеси. Для этого требуется определить границы устойчивого горения в широком диапазоне изменения состава алюминиево-воздушной смеси ($\alpha \approx 0,3 \div 3,0$). Тогда по полученным значениям скорости срыва пламени U_0 можно будет видеть закономерность изменения скорости распространения пламени U_f при соответствующих составах алюминиево-воздушной смеси.

Известно [11], что изготовление керамических материалов и, в частности, алюмооксидной керамики базируется на производстве высококачественных исходных НДП, обладающих заданным химическим, морфологическим и гранулометрическим составом. Кроме того, применяемые НДП должны иметь узкое распределение частиц по размерам и не иметь склонности к агломерации. [48]. Поэтому для получения НДП Al_2O_3 с заданными свойствами необходим рабочий процесс, более эффективный, по сравнению с тем который реализуются в прямоточных камерах сгорания.

Оптимизацию рабочего процесса в двигательной установке (увеличение полноты сгорания), можно осуществить посредством увеличения времени пребывания частиц алюминия в камере сгорания. Для этого необходимо проанализировать существующие схемы организации внутрикамерных процессов в прямоточных камерах и предложить более совершенную схему.

В качестве источника инициирования процесса горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия используется либо высокотемпературная струя продуктов сгорания [1] или мощный электрический разряд [17, 23].

Наиболее эффективным способом воспламенения алюминиево-воздушного потока, является электрическая свеча поверхностного разряда [57-59]. Она способна инициировать узкий очаг пламени в локальной области потока и обладающая возможностью многократного включения в случае срыва или проскока пламени.

Для обеспечения надёжного воспламенения и стабилизации пламени в потоке аэрозвеси в форкамере установки синтеза Al_2O_3 представленной на рисунке 1.14, необходима низкая скорость потока 10 м/с и переобогащённый состав смеси. Однако, сжигание аэрозвеси частиц алюминия при переобогащённом составе смеси ($\alpha = 0,04 \div 0,3$) приводит к тому, что в реакцию с алюминием вступает азот воздуха и как следствие продуктом сгорания является нитрид алюминия (AlN_K). А это негативно отражается на химической чистоте конечного продукта.

Для исключения реакции азотирования необходимо производить воспламенение потока аэрозвеси в форкамере установки при составе смеси близком к стехиометрическому ($\alpha \approx 1,0$). В этом случае будет обеспечена высокая чистота продукта, а процесс горения будет протекать в парофазном режиме, при максимальной температуре с высокой полнотой сгорания. Все эти условия, в совокупности, обеспечивают высокодисперсный конечный продукт, т.е. размер частиц Al_2O_3 будет лежать в левой моде (см. рисунок 1.9).

В установке, представленной на рисунке 1.18, для стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси используется тело плохобтекаемой формы. Недостатком данного способа организации рабочего процесса является низкая скорость алюминиево-воздушного потока $5 \div 20$ м/с. Скорость набегающего потока алюминиево-воздушной смеси выше 20 м/с приводит к уменьшению времени пребывания частиц Al и срыву пламени и следовательно к необходимости повторного воспламенения смеси.

Наиболее предпочтительным вариантом схемы организации рабочего процесса с целью надежного воспламенения и устойчивой стабилизации фронта пламени в камерах сгорания двигательных и технологических установок, является внезапное расширение канала [57-59]. Камера сгорания в виде канала с внезапным расширением позволяет стабилизировать фронт пламени при $\alpha \approx 1$, при высоких скоростях потока аэровзвеси частиц алюминия $40 \div 200$ м/с и рабочим давлением 0,1 МПа.

Рабочее давление 0,1 МПа в камере сгорания установки обеспечит максимальную долю ультрадисперсного оксида алюминия S_{UD} в продуктах сгорания, то есть позволит увеличить производительность установки (см. рисунок 1.11).

Известно [2], что время пребывания увеличивает полноту сгорания частиц алюминия и соответственно влияет на дисперсность продуктов сгорания. Одним из способов, с помощью которого можно увеличить время пребывания является закрутка потока, которая широко применяется в камерах сгорания летательных аппаратов. Применение закрутки потока воздуха будет способствовать формированию вихревой зоны с высоким градиентом давления в поперечном сечении камеры сгорания. В тоже время формирование приосевой вихревой зоны способствует смещению максимума температуры от стенок камеры сгорания к оси [60], что позволяет уменьшить габаритные размеры камеры сгорания и увеличить срок ее эксплуатации. В связи с чем, для двигательных и технологических установок, вихревая камера будет более предпочтительной, чем прямоточная.

При организации рабочих процессов в камерах сгорания двигательных и технологических установок на порошкообразном алюминии, потребуются эффективные методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия. Поэтому для разработки методов и средств управления необходимо установить закономерности и выявить особенности процессов воспламенения, горения и стабилизации пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия. На основании анализа состояния вопроса для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования:

- Выполнить моделирование структуры течения потока аэровзвеси частиц алюминия в вихревой камере сгорания и установить зависимость времени пребывания частиц алюминия от параметра закрутки.
- Экспериментально исследовать структуру течения и определить локальное время пребывания частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением.
- На основе модели очагового теплового зажигания определить критический радиус очага и условия воспламенения аэровзвеси частиц алюминия в зоне рециркуляции.
- Определить границы воспламенения и стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 0,1 \div 3,0$.
- На основе выявленных особенностей и установленных закономерностей по воспламенению, горению и стабилизации пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия разработать методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Экспериментальная установка и оборудование

Для решения экспериментальных задач по исследованию процессов горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия использовался стенд научно-образовательного центра «Физика горения энергоемких материалов» при Тольяттинском государственном университете. Общий вид стенда для огневых испытаний представлен на рисунке 2.1.

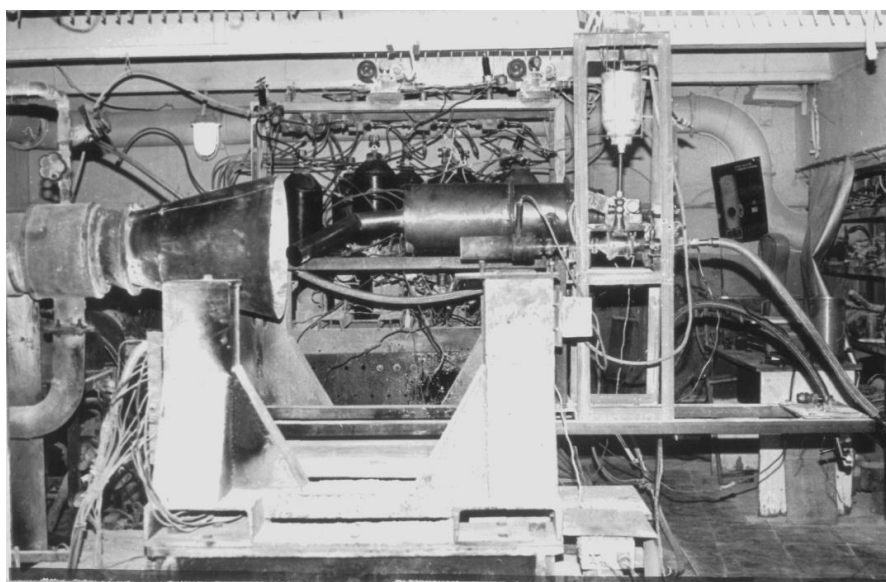


Рисунок 2.1 – Общий вид стенда

Источником сжатого воздуха служила баллонная батарея, состоящая из двадцати баллонов емкостью 40 литров каждый, установленных на одной рампе. Воздух в баллонную батарею закачивался компрессорной станцией УКС-400 под давлением 150 атм. Снижение начального давления со 150 атм. до рабочего производилось с помощью редукторов, далее воздух по общей магистрали, минуя электроздвижку, поступал в расходомерный участок. Измерение расхода воздуха осуществлялось стандартным мерным участком трубопровода диаметром 50 мм с установленной в нем диафрагмой

диаметром 15 мм. Статическое давление и перепад давлений перед диафрагмой и за ней измерялись датчиками давления ИКД-27ДФ, сигнал от которых поступал на цифровые вольтметры В7-23. Измерения температуры воздуха производились хромель-копелевыми термопарами в комплекте с прибором ЭПВ-2.

Для проведения экспериментов с подогревом воздуха использовался теплообменник, который был установлен за расходомерным участком. Теплообменник представлял собой цилиндрическую обечайку, внутри которой находился участок трубопровода, выполненный в форме змеевика из жаропрочной стали. В одну из торцевых стенок обечайки была вмонтирована горелка. Высокотемпературные продукты сгорания нагревали змеевик и воздух, проходящий через него, а затем удалялись через отверстие в противоположной торцевой стенке обечайки. Таким образом, нагрев воздуха производился без баллаستирования его продуктами сгорания.

Разработанная экспериментальная установка позволяла получать на рабочем участке поток со следующими параметрами: расход порошка алюминия 0,003...0,3 кг/с; расход воздуха 0,01...0,5 кг/с; скорость воздуха 10...300 м/с; температура воздуха 293...773 К; давление - 0,1 МПа.

В первом разделе было отмечено, что предпочтительным вариантом организации рабочего процесса в камерах сгорания двигательных и технологических установок, является внезапное расширение канала. Канал с внезапным расширением обеспечивает стабилизацию фронта пламени при более высоких скоростях набегающего потока аэрозвеси частиц алюминия, чем перфорированные пластины и плохообтекаемое тело и более широком диапазоне значений коэффициента избытка воздуха. Рабочее давление 0,1 МПа позволяет использовать наиболее простую - эжекторную систему подачи порошка алюминия в камеру сгорания.

Сменные рабочие участки установки, представляли собой каналы с внезапным расширением со следующими геометрическими параметрами: диаметр на выходе из канала с внезапным расширением $D_K = 40 \div 80$ мм;

диаметр входного отверстия $d_0 = 20 \div 40$ мм; относительная длина канала с внезапным расширением $L_K/d_0 = 5,5 \div 8,0$; степень внезапного расширения ($r^* = R_K/r_0$) варьировалась в диапазоне $2,0 \div 4,5$; в качестве характерного размера использовался параметр H ($H = D_K - d_0$), который изменялся от $0,02 \div 0,05$.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.2

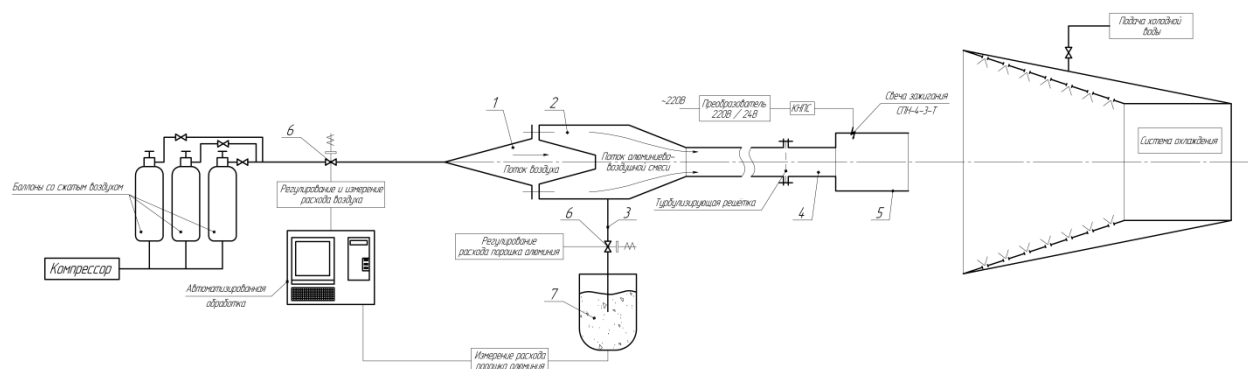


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки

Работа установки осуществлялась следующим образом: под действием разряжения, создаваемого активной струей воздуха, истекающей из сопла эжектора 1, алюминиевый порошок из бункера 7 через заборную трубку 3 подавался в приемную камеру эжектора 2. Из приемной камеры порошок алюминия попадал в камеру смешения эжектора 4, где он перемешивался с воздухом, образуя алюминиево-воздушную смесь (аэрозоль), которая затем поступала в камеру сгорания с внезапным расширением 5. Расходы воздуха и порошка алюминия регулировались при помощи задвижек с электрическим приводом 6.

Для измерения расхода порошка алюминия была разработана специальная система, состоящая из силоизмерительного датчика ДСТ-0,01, электросекундомера, аналого-цифрового преобразователя с выходом на компьютер. Разработанная и отлаженная система позволяла осуществлять подачу порошка алюминия в камеру сгорания с секундным расходом от 0,003 до 0,3 кг и плавную регулировку в указанном диапазоне.

Уровень турбулентности набегающего потока на входе в канал с внезапным расширением варьировался посредством установки турбулизирующих решеток, которые представляли собой перфорированные диски (рисунок 2.3).

Перфорированные диски с определенными геометрическими параметрами (числом n и диаметр отверстий M , толщина перемычек b , коэффициент живого сечения f) устанавливались во входном канале на различных расстояниях до плоскости внезапного расширения l_p .



Рисунок 2.3 - Турбулизирующие решетки:

а - для входного канала диаметром 0,02 м
($M = 0,037$ м; $b = 0,0007$ м; $n = 19$; $f = 0,65$);

б - для входного канала диаметром 0,04 м
($M = 0,004$ м; $b = 0,0015$ м; $n = 48$; $f = 0,5$);

Для получения аэрозвеси и исследования процессов горения в потоке аэрозвеси использовались порошки марок АСД-1 и АСД-4, соответствующие отраслевому стандарту на их морфологический и гранулометрический состав.

Источником инициирования процесса горения служила электрическая свеча, которая устанавливалась на определенном расстоянии за плоскостью внезапного расширения.

Предварительно, были проведены испытания нескольких вариантов свечей на предмет обеспечения надежного зажигания высокоскоростного

потока аэрозвеси частиц алюминия. Для инициирования процесса зажигания были выбраны три авиационных свечи, представленные на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Свечи зажигания

1 – СП-30; 2 – СД-48 БСМ; 3 – СПН-4-3-Т

По результатам испытаний для проведения дальнейших исследований была выбрана наиболее эффективная свеча поверхностного разряда СПН-4-3-Т.

Выхлопная система экспериментальной установки обеспечивала водяное охлаждение алюминиево-воздушного факела и предусматривала удаление продуктов сгорания в виде суспензии.

Измерения температуры алюминиево-воздушного факела производились термоизмерительным комплексом АГА-782. Термоизмерительный комплекс АГА-782 состоял из блока камеры, индикатора теплового изображения и индикатора выделенной строки. Экран выделенной строки фотографировался камерой АНФ с частотой $f = 1$ кадр/с. На экране индикатора теплового изображения визуализировалась картина относительного распределения температур в струе (более интенсивный фон

соответствовал более высокой температуре). Индикатор выделенной строки обеспечивал визуализацию распределения температуры по оси струи в реальном времени с частотой $f = 16$ строк/с. Также применялся метод прожигания металлических сеток. Измерения температуры продуктов сгорания в камере - с помощью вольфрам-рениевых термопар ИС-629 с рабочим диапазоном 300...2773 К и толщиной спая 0,2 мм.

Для исследования структуры течения двухфазного алюминиево-воздушного потока и определения времени пребывания частиц Al в камере сгорания применялся оптический метод с использованием высокоскоростной киносъемки. Методом высокоскоростной киносъемки проводились также исследования процессов воспламенения и горения порошкообразного Al. Для этих целей служила кинокамера СКС-1М, позволяющая производить съемку со скоростью до 5000 кадр/с. Достоинство этого метода заключается в том, что при необходимости можно производить по кадровое исследование, то есть с высокой точностью делать пространственно-временные измерения. Для этого были изготовлены прозрачные модели камер сгорания с внезапным расширением из тугоплавкого стекла «Пирекс». Одна из таких моделей представлена на рисунке 2.5.

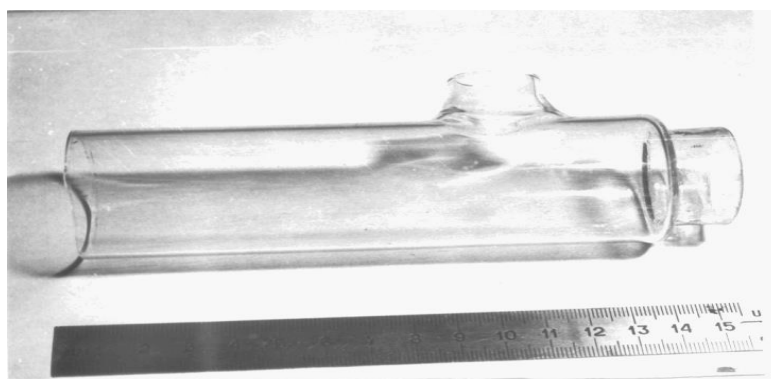


Рисунок 2.5— Модель камеры сгорания из тугоплавкого стекла «Пирекс»

Также для исследования течения изотермического воздушного потока в моделях камер сгорания с внезапным расширением использовался метод «масляной пленки» [61, 62].

Для исследования влияния частоты псевдотурбулентных пульсаций, накладываемые на дискретные струи воздуха, вдуваемые в слой смешения за плоскостью внезапного расширения, на характеристики горения потока аэрозвеси были изготовлены соответствующие модели камер сгорания, разработана и смонтирована экспериментальная установка.

Схема установки для исследования характеристик горения при вдуве в камеру сгорания нестационарных струй воздуха представлена на рисунке 2.6.

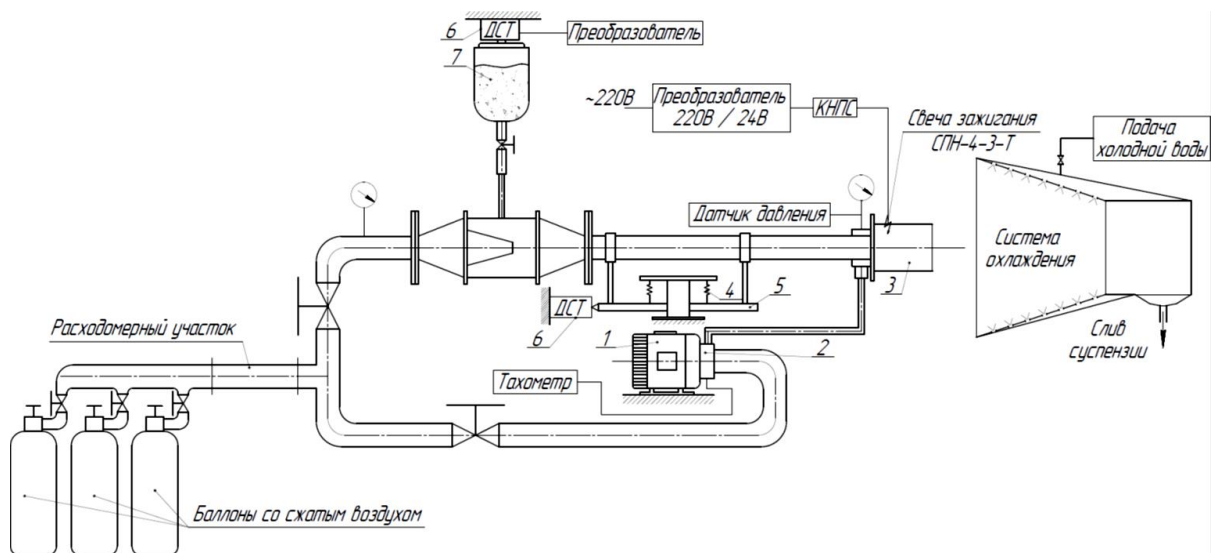


Рисунок 2.6 – Схема экспериментальной установки

1 – электродвигатель; 2 – пульсатор; 3 – камера сгорания; 4 – упругие элементы; 5 – датчик давления; 6 – датчик силоизмерительный; 7 – бункер подачи порошка алюминия

2.2 Методика проведения исследования

Характеристики процесса горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия определялись с применением апробированных методик, которые давно и успешно используются в экспериментальных исследованиях процессов горения в потоке [63-65].

Пределы стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия определялись посредством проведения серии испытаний с достижением срыва пламени при атмосферном давлении и температуре воздуха 293К. При произвольном расходе воздуха и порошка алюминия производилось поджигание потока аэровзвеси, после наступления установившегося процесса горения уменьшался расход порошка до наступления срыва. После того как расходы порошка алюминия и воздуха, соответствующие «бедному» срыву пламени были зарегистрированы, процесс горения восстанавливали и при том же самом расходе воздуха увеличивали расход алюминия до достижения «богатого» срыва пламени. Эти циклы повторялись при других значениях расхода и скорости воздуха до тех пор, пока не определялся весь диапазон устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

Коэффициент избытка воздуха α рассчитывали по отношению измеренных расходов порошка алюминия и воздуха. Расход порошка алюминия рассчитывался посредством фиксации значений начального веса бункера с порошком и веса бункера после проведения замера, также проводилась фиксация времени замера.

Зная вес бункера в начале и конце замера, т. е. общий расход порошка и время, за которое он был израсходован, секундный расход горючего порошка алюминия можно вычислить по формуле:

$$G_{Al} = \frac{G_{\Theta}}{\tau}$$

где G_{Θ} - вес израсходованного порошка, г; τ - время, с.

Расход воздуха на входе в камеру сгорания рассчитывался с помощью газодинамических функций по формуле $G_B = m \cdot \frac{P \cdot F \cdot y(\lambda)}{\sqrt{T^*}}$,

где m - численный коэффициент для воздуха при $k = 1,4$ и $R = 287,3$ Дж/кгК, равный $0,0404 \text{ сК}^{0,5}/\text{м}$; P - статическое давление, Н/м²; F - площадь входного

канала, м²; $y(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right) \cdot \frac{\lambda}{1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2}$; T^* - температура торможения воздуха,

К.

Коэффициент избытка воздуха α рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{G_B}{L_0 \cdot G_{Al}}$$

где G_B - расход воздуха; L_0 - стехиометрическое соотношение для реакции алюминия с воздухом $L_0 = 3,84$; G_{Al} - расход порошка алюминия, кг/с.

Скорость воздуха во входном сечении камеры сгорания определяли по формуле $U_0 = \lambda \cdot a_{кр}$, где λ - приведенная скорость; $a_{кр}$ - критическая скорость.

Скорость потока смеси на входе, при которой происходит срыв пламени $U_{ср}$, определяли как среднеобъемную скорость воздуха в поперечном сечении камеры смешения эжектора (с учетом измеренной температуры воздуха в плоскости внезапного расширения).

Через интерфейс RS-232 все необходимые начальные параметры потока аэрозвеси для проведения расчетов поступали на компьютер для автоматизированной обработки данных.

Экспериментальные данные по определению границ устойчивого горения были приведены к зависимости вида $U_{ср} = f(\alpha)$. На представленных в диссертации графиках каждой точке соответствует, как минимум пять измерений.

Исследование процесса зажигания потока аэрозвеси частиц алюминия проводилось на основании модели очагового теплового воспламенения [66]. Согласно этой модели, искровой разряд приравнен к точечному, мгновенно действующему тепловому источнику и энергия, выделяемая искровым разрядом, нагревает до некоторой температуры сферический объем аэрозвеси радиусом r . Накопленное в этом объеме тепло теплопроводностью передаётся окружающей аэрозвеси, вследствие чего температура в первоначально нагретом объеме снижается, а окружающей

аэровзвеси – увеличивается. Инициирование процесса горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия осуществлялось электроискровым разрядом свечи установленной в пределах донной области зоны рециркуляции, образующейся за плоскостью внезапного расширения канала. Визуализация процесса развития начального очага воспламенения в зоне рециркуляции осуществлялась при помощи оптического метода с использованием кинокамеры СКС-1М.

Методика определения пределов зажигания в турбулентном потоке аэровзвеси частиц алюминия была аналогична методике, для газоздушных горючих смесей, представленной в [63]. При постоянном расходе воздуха, порошка алюминия и температуре аэровзвеси на входе канала с внезапным расширением делались попытки воспламенить поток аэровзвеси при различных значениях расхода порошка алюминия к расходу воздуха $\chi = G_{Al}/G_B$.

Об успешной попытке воспламенения, свидетельствовало продолжение процесса горения после выключения свечи зажигания. Максимальное время, отводимое для каждой попытки составляло ≈ 10 с. Испытания, повторялись для других значений массового расхода воздуха до тех пор, пока не была определена область устойчивого зажигания.

Эксперименты по исследованию влияния начальной турбулентности потока аэровзвеси с АСД-4 на развитие начального очага зажигания проводились посредством установки турбулизирующих решеток во входном канале на различных расстояниях до плоскости внезапного расширения l_p .

Влияние начальной турбулентности на характер развития начального очага зажигания в потоке аэровзвеси содержащей порошок АСД-1 проводили по другой методике. Для того, что бы исключить влияние дисперсной фазы на турбулентность несущего воздушного потока подача компонентов аэровзвеси с АСД-1 в камеру сгорания осуществлялась отдельно. В процессе этих испытаний воздух в камеру поступал через входное отверстие, а навеска

порошка Al подавалась через специальный штуцер непосредственно в зону рециркуляции.

2.3 Расчёт погрешности измерений

Расход алюминиевого порошка определялся по формуле $G = \frac{(m_1 - m_2)}{\Delta \tau}$

где m_1 - первоначальный вес бункера; m_2 - вес бункера в конце замера; $\Delta \tau$ - время замера. Погрешность всей системы будет включать в себя:

1. Погрешность вторичного прибора Ф-4232/2-0,15% от верхнего предела измерения. В условиях эксперимента $\delta_2 = \bar{m}_N / \bar{m} \cdot \delta_{прив}$, т.е. $\delta_2 = 0,25\%$.

2. Погрешность секундомера - 0,2с. При времени дозирования $\Delta \tau = 40$ с погрешность измерения интервала времени $\delta_3 = 0,2 / 40 = 0,50\%$.

3. Погрешность устройства управления определяется разницей между временем срабатывания и временем отпускания электромагнитного реле. Это примерно 0,2с, т.е. при времени дозирования 40с погрешность будет $\delta_4 = 0,50\%$.

4. Погрешность датчика силы ДСТ равна 1 % от верхнего предела 10 кг. Погрешность измерения массы в 1 кг составит $\delta_1 = 1\%$.

5. Погрешность, обусловленная подсосом воздуха, составит в среднем ~ 20 г, или в относительных единицах $\delta_0 = 20 / 1000 \text{ г} = 2\%$.

Суммарная погрешность измерения $m_1 - m_2$ алюминиевого порошка с учетом некоррелированности составляющих $\sqrt{2^2 + 1^2 + 0,5^2 + 0,5^2} = 2,35\%$
Погрешность времени дозирования $\Delta \tau - \delta_3 = 2\%$.

Поскольку измерения $G = \frac{(m_1 - m_2)}{\Delta \tau}$ косвенные, а как известно [67],

погрешность обработки результатов косвенного измерения вида $\chi = A^a \cdot B^b$

есть $\sigma = \sqrt{a^2 \left(\frac{\sigma_A}{A} \right)^2 + b^2 \left(\frac{\sigma_B}{B} \right)^2}$, в нашем случае $A = m_1 - m_2$; $a = 1$; $B = \Delta \tau$;

$b = -1$, т.е. погрешность $\sigma = \sqrt{\delta_{\Sigma 1}^2 + (\Delta \tau - \delta_3)^2} = \sqrt{2^2 + 2,35^2} = 3,08\%$.

Погрешность, измерения температуры продуктов сгорания аэровзвеси частиц алюминия, составляла $\sim 5...10\%$, а расхода воздуха посредством стандартной диафрагмы $\sim 1,5...2,0\%$.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

3.1 Математическое моделирование течения в камере сгорания

Численный эксперимент в настоящее время – это один из эффективных путей теоретического исследования. Он базируется на использовании математических моделей реальных процессов, в частности физических. Чем точнее модель отражает какой-то процесс, тем лучше соответствие результатов, полученных на основе этой модели и опыта [68].

Моделирование внутрикамерных процессов подкрепленное экспериментальными данными по выявлению основных физических закономерностей, целесообразно использовать для минимизации времени на разработку камеры сгорания и стоимости ее изготовления.

Как правило, в большинстве камер сгорания происходят рециркуляционные потоки, поэтому для детального расчета поля течения требуется применение итерационных методов. Математическая модель осесимметричного течения описывается системой двумерных эллиптических уравнений, которые формулируются в переменных завихренность - функция тока либо в естественных переменных скорость - давление.

Моделирование течения, тепломассопереноса и горения в алюминиево-воздушном потоке представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку для его описания необходимы точные численные методы и соответствующие модели турбулентности и горения. Кроме того, необходимо рассматривать в поле течения две фазы с учетом обмена между ними импульсом, массой и теплом [69, 70]. Поэтому на данном этапе было принято решение разработать модель вихревой камеры сгорания и исследовать гидродинамика течения воздушного потока, а также структуру течения потока аэровзвеси частиц алюминия без горения.

Для построения модели камеры сгорания и проведения расчётов был выбран программный комплекс САПР SolidWorks. Комплекс SolidWorks позволяет генерировать расчетную сетку непосредственно по созданной модели. Обеспечивает автоматическое создание расчетной области и генерации сетки в области твердого тела и области течения, а также учитывает особенности свойств газов, геометрию течения, ламинарное и турбулентное течение. Проведение компьютерного моделирования позволит определить оптимальные характеристики потока и особенности влияния этих параметров на размеры и форму ЦТРЗ.

В таблице 3.1 представлены начальные условия моделирования структуры течения потока в вихревой камере сгорания.

Таблица 3.1- Начальные условия

№	Наименование параметра	Значение параметра
1.	Тип течения	Турбулентное
2.	Статическое давление	1 МПа
3.	Начальная температура	293 К
4.	Вектор скорости в направлении оси X	10 ÷ 50м/с
5.	Текущая среда	Воздух
6.	Интенсивность турбулентности	5%
7.	Тепловое условие стенок	Адиабатическое

Созданная с помощью SolidWorks модель вихревой камеры сгорания представлена на рисунке 3.1.

Вихревая камера сгорания содержит: фронтное устройство, представляющее собой форкамеру в виде осесимметричного канала с внезапным расширением оснащенного лопаточным завихрителем с диффузорной насадкой; коллектор вторичного воздуха с 3 рядами отверстий для поперечного вдува струй воздуха и конфузорное сопло.

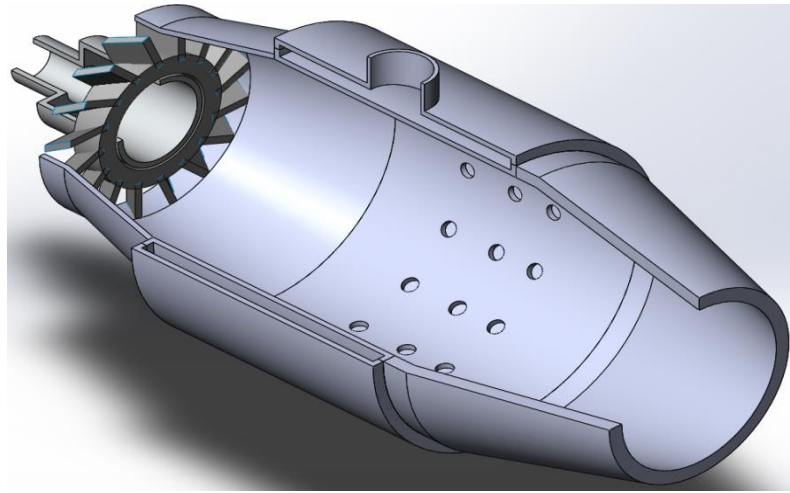


Рисунок 3.1 - 3D-модель вихревой камеры сгорания

Исследования заключались в определении зависимости размеров ЦТРЗ от параметра закрутки, а также влияние параметра закрутки на время пребывания частиц алюминия в камере сгорания.

Продольная компонента скорости (в направлении оси X) на входе в канал с внезапным расширением варьировалась в пределах от 10 до 50 м/с. Давление внутри установки атмосферное – 0,1МПа. Закрутка спутного воздушного потока, характеризуемая параметром закрутки S , рассчитывалась по методике [71]. Параметр закрутки S представляет собой безразмерное отношение осевой компоненты потока момента количества движения (G_θ) к произведению осевой компоненты потока количества движения (G_x) и эквивалентного радиуса сопла $\left(\frac{d}{2}\right)$: $S = G_\theta / \left(G_x \cdot \frac{d}{2}\right)$.

В качестве двухфазного потока использовалось моделирование траектории движения частиц алюминия размером 7,4 мкм, что соответствует порошку алюминия марки АСД-4. Скорость частиц алюминия принималась равной скорости воздуха.

На первом этапе было проведено моделирование течение воздушного потока, с начальной скоростью 10 м/с и пошаговым увеличением интенсивности закрутки S от 0 до 3,0.

Установлено, что для воздушного потока формирование ЦТРЗ наблюдается при значении параметра закрутки спутного потока воздуха $S = 1,2$. Скорость воздуха в зоне обратного течения при этом составляет – 1 м/с. Дальнейшее увеличение величины параметра закрутки спутного потока воздуха не привело к существенным изменениям структуры течения в камере сгорания.

Картина течения воздушного потока в камере сгорания при значениях начальной скорости потока на входе $U_0 = 10\text{ м/с}$ и параметра закрутки $S = 1,8$, показано на рисунке 3.2.

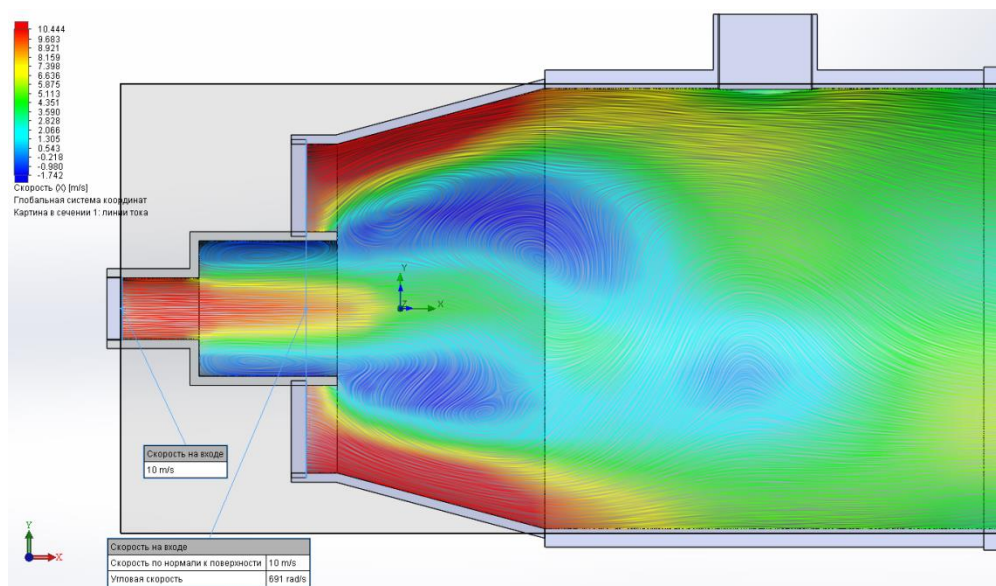


Рисунок 3.2 - Течение воздушного потока

$$S = 1,8; U_0 = 10\text{ м/с}$$

На рисунке 3.3 представлена схема расчета геометрических параметров ЦТРЗ. Обозначения на рисунке: L – длина и H – ширина ЦТРЗ, взяты в отношении к диаметру входного отверстия d_0 . Ширина зоны рециркуляции рассчитывалась по выражению $H = H_1 - H_2$. Длина ЦТРЗ определялась от плоскости выходного сечения канала с внезапным расширением.

Влияние величины закрутки S на относительную длину (L/D) ЦТРЗ, представлено на рисунке 3.4.

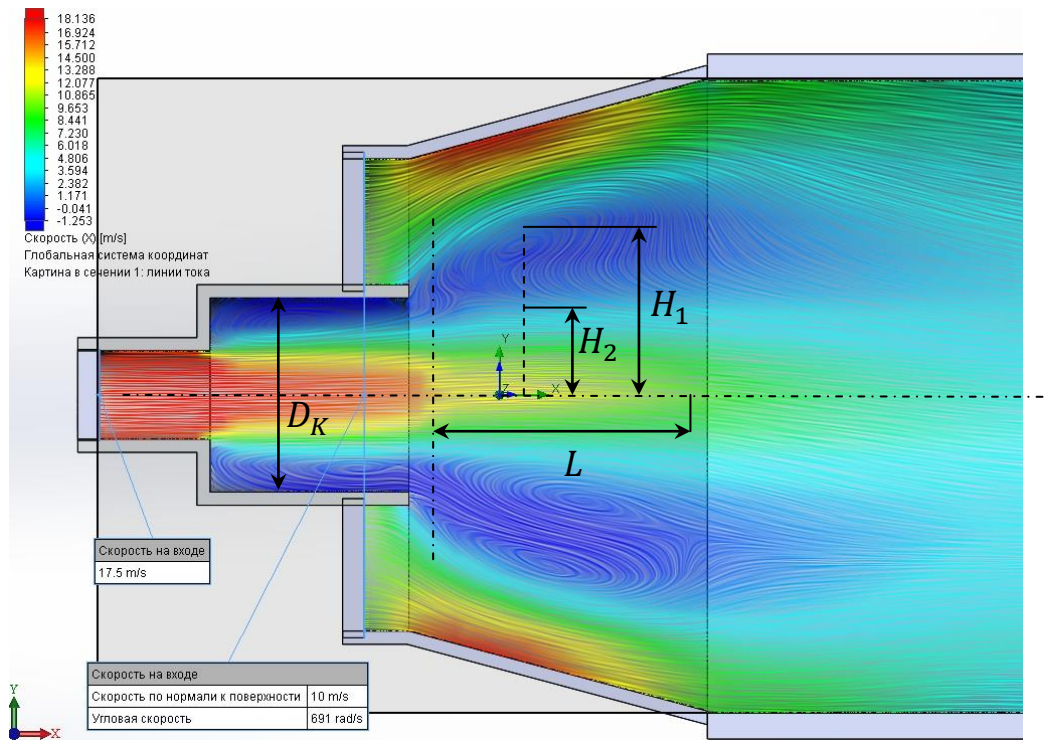


Рисунок 3.3 - Схема расчета геометрических параметров ЦТРЗ

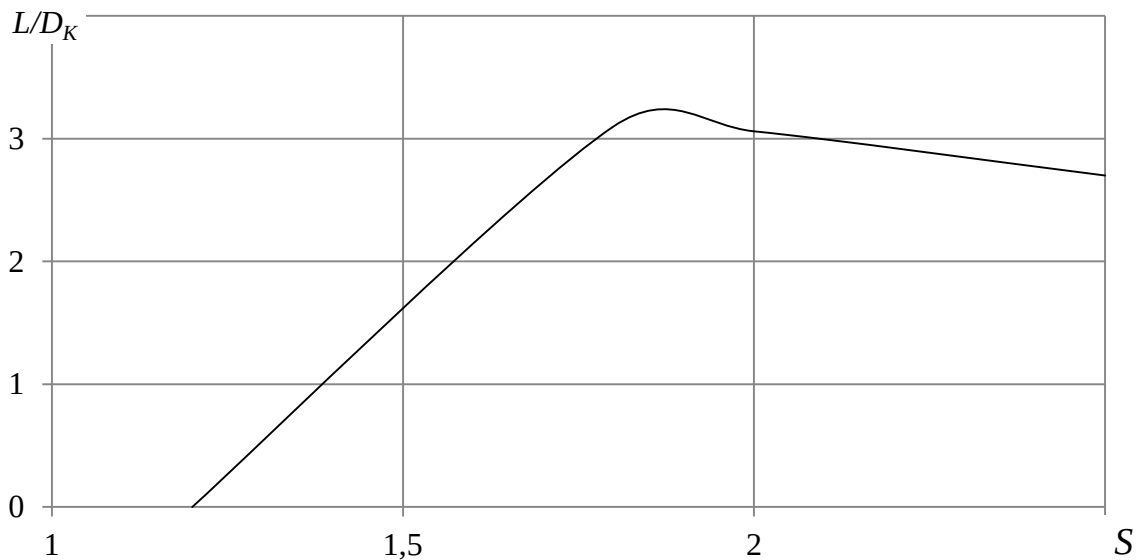


Рисунок 3.4 - Влияние величины закрутки S на L/D_K

$$U_0 = 10 \text{ м/с}$$

Было установлено оптимальное значение параметра закрутки $S = 1,8 \dots 2,0$, при котором происходит формирование зоны рециркуляции максимальной длины. На следующем этапе было проведено моделирование течения воздушного потока с начальной скоростью 17,5 м/с с пошаговым увеличением закрутки S от 0 до 2,5.

Было установлено, что с момента начала формирования зоны рециркуляции при $S = 1,2$ её длина и ширина меняются незначительно и составляют 5 и 0,7 калибров соответственно. Скорость воздуха в зоне обратного течения ЦТРЗ достигала значений -2 м/с. Дальнейшее увеличение начальной скорости потока приводит к тому, что для формирования зоны рециркуляции необходимо повышать интенсивность закрутки потока воздуха. Так для начальной скорости однофазного потока $U_0 = 37,5$ м/с формирование зоны рециркуляции происходит при интенсивности закрутки спутного потока воздуха $S = 3,0$.

Результаты моделирования структуры двухфазного потока алюминиево-воздушной смеси с частицами порошка марки АСД-4 ($d_{32} = 7,5$ мкм) при параметре закрутки с $S = 1,2$ показали, что частицы алюминия не вовлекаются в ЦТРЗ и под действием центробежной силы перемещаются к стенкам камеры. При дальнейшем увеличении параметра закрутки до значения $S = 1,8$, удалось получить ЦТРЗ, в которую вовлекались частицы алюминия.

На рисунке 3.5 представлена структура течение потока частиц алюминия марки АСД-4.

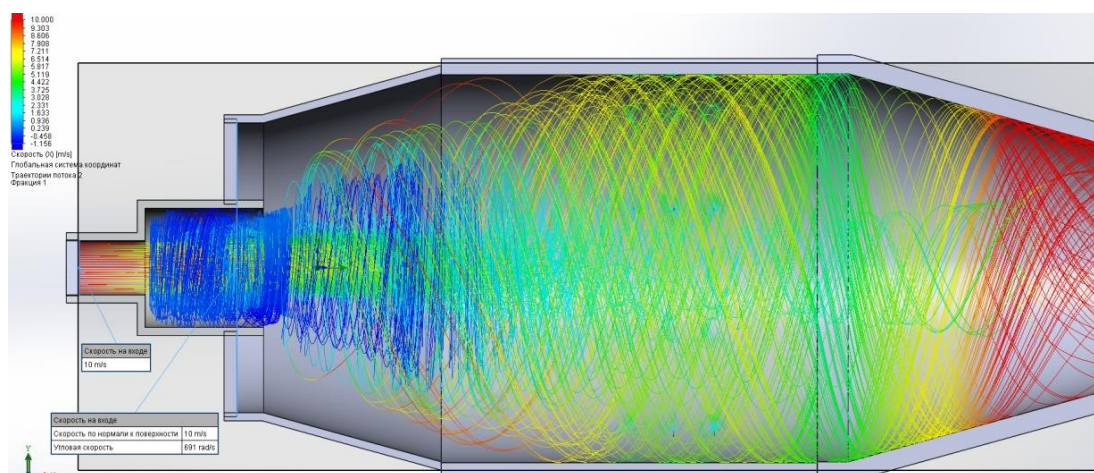


Рисунок 3.5- Структура течение потока частиц алюминия АСД-4

$$S = 1,8; U_0 = 10 \text{ м/с}$$

Как видно из рисунка 3.5 скорость движения частиц в зоне рециркуляции составляет $\approx 1,1$ м/с

Далее проводились расчетные исследования влияния параметра закрутки на время пребывания частиц алюминия в камере сгорания. Зависимость времени пребывания частиц алюминия в камере сгорания от параметра закрутки S представлена на рисунке 3.6.

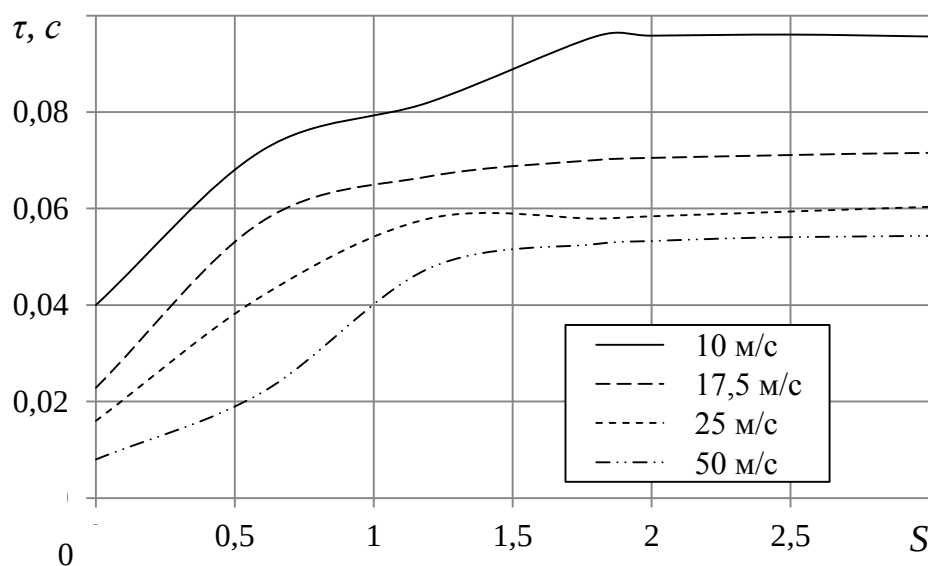


Рисунок 3.6 - Зависимость времени пребывания частиц алюминия в камере сгорания от параметра закрутки S

Из рисунка видно, что при значении параметра закрутки $S \geq 1,8$ время пребывания частиц алюминия в камере сгорания остаётся постоянным. Это говорит о том, что значение $S \approx 1,8$ является критическим, с увеличением которого, время пребывания частиц алюминия практически не изменяется. Также видно, что с увеличением начальной скорости потока с 10 до 50 м/с время пребывания частиц алюминия в камере сгорания уменьшается.

Турбулентное течение газа с переменной плотностью, возникающее при взаимодействии потока продуктов сгорания и струй воздуха, пока не удастся точно описать с помощью современных методов моделирования; потребуется значительное усовершенствование этих методов, прежде чем их можно будет уверенно применять в задачах проектирования камер сгорания

[63]. Обычно считают, что удовлетворительное поле температур можно получить при правильном выборе глубины проникновения и числа струй, которые образуют достаточно локализованные зоны перемешивания, но число и размер отверстий можно определить лишь экспериментально. Тем не менее, такие исследования полезны для определения тенденций влияния конструктивных и режимных параметров. На данном этапе исследований было определено необходимое количество отверстий и их диаметр для оптимального вдува поперечных струй вторичного воздуха в основную камеру сгорания.

3.2 Исследование структуры течения потока аэровзвеси в форкамере

Известно [2], что, потоки аэровзвеси частиц металлов используемые в реактивных двигателях и технологических установках, относятся к «флюидным потокам» с большой относительной концентрацией дисперсной фазы ($\mu > 50$).

Расчеты, проведенные в [73] при вариации диаметра частиц $2 \text{ мкм} < d_{32} < 100 \text{ мкм}$ и начальной скорости несущего газа в пределах $10 \text{ м/с} < U_0 < 50 \text{ м/с}$, свидетельствуют о существенном влиянии начальной крутки частиц на их траектории и соответственно на распределение в объеме камеры. В зависимости от значения и знака начальной угловой скорости частицы движутся либо по направлению, либо против направления силы Магнуса, превышающей при больших положительных угловых скоростях силу тяжести. Было отмечено, что частицы, достигающие стенки камеры, циркулируют в придонном слое с почти постоянной скоростью.

Методом визуализации с применением высокоскоростной киносъемки был обнаружен эффект спонтанной закрутки потока аэровзвеси в камере, с внезапным расширением математически доказанный Ю.Г. Губаревым и Б.А. Луговцевым [72]. Плоскость вихревого закрученного течения была

перпендикулярна оси камеры и занимала $\sim 1/3$ длины зоны рециркуляции. В вихревом течении с закруткой наблюдалась поперечная миграция частиц, которая приводила к повышенной концентрации наиболее крупных частиц в пристенной области.

На рисунках 3.7 представлена картина течения потока аэровзвеси частиц алюминия в модели форкамеры сгорания с внезапным расширением.

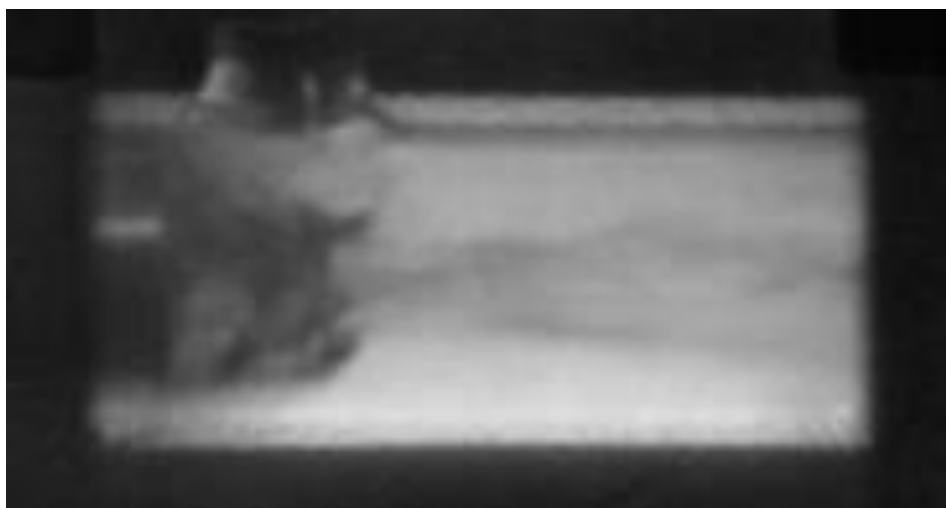


Рисунок 3.7 –Течение потока аэровзвеси в форкамере порошок марки АСД-1 ($d_{32} = 17,4$ мкм); $D_{КС} = 0,042$ м; $U_0 = 50$ м/с; $\alpha = 0,1$; $\varepsilon_0 = 5$ %; скорость съемки 700 кадр/с

На рисунке хорошо виден основной поток аэровзвеси и границы кольцевого вихря в донной области зоны рециркуляции. Концентрация частиц Al в донной области зоны рециркуляции неравномерна - в нижней части она больше. Этот факт объясняется тем, что турбулентные моли проницаемы для тонкодисперсных частиц Al, в результате чего при гравитационном оседании концентрация внизу больше, чем вверху. Кроме того, наблюдалась пространственная неоднородность концентрации частиц Al по длине зоны рециркуляции.

Установлено, что с увеличением среднего размера частиц d_{32} с 7,5 до 17,5 мкм их концентрация в донной области повышается, поэтому процесс оседания грубодисперсных частиц Al отличается от процесса, рассмотренного

выше. Поскольку грубодисперсные частицы АСД-1 обладают заметной скоростью гравитационного оседания, они не могут длительное время находиться внутри одного моля, поэтому в процессе своего движения такие частицы пересекают множество молей.

Сгорание порошкообразного Al в потоке воздуха, поступающего в камеру сгорания технологической или двигательной установки, в общем случае будет определяться, с одной стороны, условиями диффузионного перемешивания продуктов сгорания с воздухом, а с другой - кинетическими характеристиками горения Al. Полнота сгорания частиц Al в большей степени определяется временем химического реагирования последних и функционально связана с временем пребывания продуктов сгорания в камере τ_{np} . Если за время пребывания частицы Al не успеют полностью прореагировать, то изменятся параметры состояния двухфазной среды в камере и характеристики истечения. Для полного сгорания частиц Al необходимо, чтобы $\tau_{np} > \tau_z$, где τ_z - время полного сгорания частиц.

Используя данные полученные скоростной киносъемкой, были определены локальные времена пребывания частиц алюминия в форкамере. Скорость частиц алюминия U_{Al} на «определяющей» поверхности, а также время контакта частиц алюминия с зоной рециркуляции τ_k , представлены в таблице 3.2.

Общеизвестно, что для газозвушной горючей смеси рост начальной турбулентности потока на входе в камеру сгорания интенсифицирует процессы тепло- и массообмена в пограничном слое и соответственно уменьшает время пребывания реагентов в зоне рециркуляции τ_{zp} .

Для аэровзвеси частиц алюминия турбулизирующая решетка оказывает неоднозначное влияние на τ_{zp} . Для аэровзвеси, содержащей частицы Al размером $d_{32} = 7,4$ мкм, увеличение начальной турбулентности на входе в камеру при установке решетки на $l_p = 0,02$ м приводит к уменьшению τ_{zp} и к увеличению τ_{zp} при установке решетки на $l_p = 0,057$ м. (см. таблицу 3.3).

Таблица 3.2 - Скорость частиц алюминия U_{Al} на «определяющей» поверхности и τ_k частиц Al с зоной рециркуляции

Марка Al	$D_{кс},$ м	$\bar{r}$	$H,$ м	$U_0,$ м/с	Без решетки ($\varepsilon_0 = 5\%$)			С решеткой $l_p = 0,057$ м ($\varepsilon_0 = 12\%$)			С решеткой $l_p = 0,02$ м ($\varepsilon_0 = 22\%$)		
					$U_B,$ м/с	$U_{Al},$ м/с	$\tau_k,$ мс	$U_B,$ м/с	$U_{Al},$ м/с	$\tau_k,$ мс	$U_B,$ м/с	$U_{Al},$ м/с	$\tau_k,$ мс
АСД-4 ($d_{32} = 7,4$ мкм)	0,05	2,5	0,03	40	18,1	19,1	5,42	19,0	17,05	5,86	19,83	21,87	4,07
				50	22,65	24,88	4,34	23,75	21,25	4,7	24,79	27,34	3,26
				60	27,08	29,78	3,62	28,5	25,5	3,92	29,75	32,81	2,71
				70	31,67	34,84	3,09	33,25	29,75	3,36	34,7	38,27	2,33
АСД-1 ($d_{32} =$ 17,4 мкм)	0,05	2,5	0,03	40	18,1	13,58	7,95	19,0	16,25	6,15	19,83	8,3	10,7
				50	22,63	16,96	6,36	23,75	20,3	4,92	24,79	10,38	8,59
				60	27,15	20,36	5,3	28,5	24,57	4,10	29,75	12,46	7,15
				70	31,67	23,25	4,64	33,25	28,43	3,51	34,7	14,53	6,13

Для частиц Al с размером $d_{32}=17,4$ мкм в обоих случаях наличие решетки увеличивает $\tau_{зр}$.

Таблица 3.3 - Влияние ε_0 на время пребывания частиц Al в основном потоке τ_0 и в зоне рециркуляции $\tau_{зр}$

Марка Al	$D_{кс},$ м	$\bar{r}$	$H,$ м	$U_0,$ м/с	Без решетки ($\varepsilon_0=5\%$)			С решеткой $l_p = 0,02$ м ($\varepsilon_0=22\%$)			С решеткой $l_p = 0,057$ м ($\varepsilon_0 = 12\%$)		
					$\tau_0,$ мс	$\tau_{зр},$ мс	$\tau_{зр}/\tau_0$	$\tau_0,$ мс	$\tau_{зр},$ мс	$\tau_{зр}/\tau_0$	$\tau_0,$ мс	$\tau_{зр},$ мс	$\tau_{зр}/\tau_0$
АСД-4	0,04	2,0	0,02	50	2,2	6,15	2,79	1,42	4,28	2,95	3,3	8,3	2,5
	0,05	2,5	0,03	50	2,32	8,38	3,6	1,78	5,72	3,2	3,5	11,3	3,2
АСД-1	0,04	2,0	0,02	50	3,3	9,99	3,0	4,9	18,0	3,67	4,9	19,0	3,87
	0,05	2,5	0,03	50	4,2	13,5	3,2	5,2	24,47	4,7	5,75	25,9	4,5
	0,04	2,0	0,02	90	1,6	3,3	2,06	-	-	-	-	-	-

Из таблицы 3.3 видно, что время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции $\tau_{зр}$ в ≈ 3 раза больше их времени пребывания в основном потоке τ_0 .

Считается общепризнанным, что положение свечи имеет определяющее влияние, как на характеристики воспламенения, так и на срок ее службы. Полученные результаты исследований позволили нам выбрать оптимальное место установки свечи зажигания $L_{зр} = (0,5 \dots 1,2)H$. Это обосновано тем, что в донной области зоны рециркуляции, концентрация частиц максимальна, а время пребывания частиц алюминия на два порядка больше чем в остальной зоне рециркуляции [2]. Поэтому эти два параметра будут способствовать воспламенению аэровзвеси частиц алюминия [22].

Место расположения свечи в указанных пределах также отвечает требованиям повторного запуска камеры в случае срыва пламени, так как электроды свечи оставались чистыми, поскольку эта часть внутренней поверхности стенки камеры не покрывалась продуктами сгорания вследствие существующей спонтанной закрутки потока в донной области зоны рециркуляции.

3.3 Выводы

1. В результате проведённого компьютерного моделирования течения в камере сгорания установлены оптимальные значения параметра закрутки $S \approx 1,8 \dots 2,0$, при которой время пребывания частиц алюминия в камере сгорания максимально.

2. Экспериментально подтвержден эффект спонтанной закрутки потока аэровзвеси в камере с внезапным расширением математически доказанный Ю.Г. Губаревым и Б.А. Луговцевым.

3. Установлено, что среднее время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции в 3 раза больше чем в основном потоке.

4. Полученные результаты экспериментальных исследований структуры течения потока аэровзвеси частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением позволили определить оптимальное место установки свечи зажигания $L_{зр} = (0,5 \dots 1,2)H$ в зоне рециркуляции.

4 ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

4.1 Экспериментальное исследование процесса воспламенения потока аэровзвеси частиц алюминия

Проблеме очагового теплового воспламенения посвящено большое количество работ численного и приближенно-аналитического характера [74-77]. Для теоретического описания процесса зажигания облака газозвеси искровым разрядом также используется модель очагового теплового воспламенения [78-80].

В тепловой теории воспламенения задача об очаговом взрыве сводится к анализу развития начального температурного профиля в реакционноспособной среде, а также определению критического значения параметра Франк-Каменецкого ($\delta^{cr} = R_0^2 / \chi \cdot t_a$), где R_0 - радиус очага разогрева; χ - температуропроводность вещества; t_a — период адиабатической индукции [81].

Одиночная сферическая частица металла в нагретом газе - очень удобный объект для описания теплового взрыва, благодаря двум особенностям:

- 1) отсутствие распределения температуры в частице (безградиентное температурное поле),
- 2) очень простое и физически четкое выражение для коэффициента теплоотдачи α .

Для мелких частиц, несмотря на возможные высокие температуры теплового взрыва, роль лучистой составляющей α_r обычно невелика. Следовательно, критерий Био можно записать $Bi = \alpha_c \cdot r_0 / \lambda_p = \lambda_g / \lambda_p$, где α_c - кондуктивная составляющая коэффициента теплоотдачи; r_0 - радиус частицы металла; λ_g - коэффициент теплопроводности газа; λ_p - коэффициент

теплопроводности частицы. Таким образом, задача сводится в чистом виде к постановке Семенова – Тодеса [82].

Закономерности теплового взрыва для одиночных частиц металлов и их совокупностей (облаков) отличаются, поскольку в совокупностях имеет место тепловое взаимодействие между частицами. В [83] дан анализ картины теплового взрыва для различных законов окисления металлов. Для линейного закона имеет место нулевой порядок тепловыделения и справедливо, как и для случая частиц взрывчатых веществ, критическое значение критерия Семенова $Se^{cr} = 1 / e$.

Вследствие нарастания окисной пленки для параболического и экспоненциального законов, имеет место сильное кинетическое (точнее, диффузионное) торможение реакции. В реальных условиях теплового взрыва оно оказывает конкуренцию аррениусовскому тепловому самоускорению. В результате предвзрывная картина заметно отличается от классической.

В силу своеобразия кинетического закона безразмерный анализ имеет свои особенности. Вместо привычных критериев Se и Td процесс определяется параметрами $\Omega = \frac{3 \cdot Se_{get}}{Td}$; $\gamma = \frac{r_0}{3\delta_{in}} \cdot Td$, $Se_{get} = \frac{Q\rho E}{\lambda_g RT_0^2} \cdot k_{get}(T_0)$,

где r_0 - начальный радиус частицы; ρ - плотность частицы; δ_{in} - начальная толщина окисной пленки; T_0 - температура в окружающей среде; Q - тепловой эффект реакции; k_{get} - предэкспоненциальный множитель [81].

Известно [42], что процесс зажигания длится с момента начала искрового разряда до установления режима устойчивого распространения пламени. Здесь существуют, по крайней мере, две проблемы. Одна из них - формирование начального очага пламени при искровом разряде, а другая неустойчивое распространение пламени этого очага. Возникновение начального очага будет зависеть от двух конкурирующих процессов: разогрев очага за счет химической реакции и теплоотвода. Поэтому в критических условиях должно выполняться равенство [79]:

$$t_{ch} = t_h + t_{ind} = t_{cool}$$

где t_{ch} – время химической реакции, t_{cool} – время охлаждения очага, t_h – время прогрева частиц в очаге, t_{ind} – период индукции теплового взрыва.

Зажигание горючей газовой смеси искровым разрядом сводится к нагреванию некоторого сферического объема этой смеси, радиус которого должен превышать характерную ширину фронта ламинарного пламени b_n . Формулу $R_{кр} \geq 3,7b_n$, предложенную Я.Б. Зельдовичем, можно рассматривать только как качественную связь между мощностью источника воспламенения и параметрами горючей смеси. Полученное значение коэффициента пропорциональности указывает лишь на порядок этой величины ввиду допущений, принятых при выводе формулы. Поэтому окончательная оценка справедливости формулы может быть сделана только на основании экспериментальных данных [83].

Для описанных в [84] экспериментов, как и для большинства других аналогичных работ, характерно, что факт зажигания фиксировался по появлению вспышки без наблюдения за формированием устойчивого фронта горения. Тогда как в настоящей работе при экспериментальном исследовании процесса зажигания в потоке аэровзвеси частиц алюминия определялся критический радиус начального очага воспламенения, и отслеживалась динамика его развития до формирования устойчивого фронта пламени в зоне рециркуляции.

Для надёжного воспламенения турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия необходимо формирование устойчивого высокотемпературного очага зажигания, обладающего достаточной температурой для воспламенения прилегающих к очагу частиц алюминия. В противном случае начальный очаг зажигания затухает и аэровзвесь не воспламеняется. Формирование начального очага зажигания в турбулентном потоке алюминиевоздушной смеси рассмотрим с точки зрения тепловой модели воспламенения, предложенной Я.Б. Зельдовичем [66].

Согласно этой модели, искровой разряд приравнен к точечному, мгновенно действующему тепловому источнику и энергия, выделяемая

искровым зарядом, нагревает до некоторой температуры сферический объём газа радиусом R_0 . Накопленное в этом объёме тепло теплопроводностью передаётся окружающей смеси, вследствие чего температура в первоначально нагретом объёме снижается, а окружающей смеси – увеличивается.

Зажигание горючей газовой смеси искровым разрядом сводится к нагреванию некоторого сферического объёма этой смеси, радиус которого $R_{кр}$ должен превышать характерную ширину фронта ламинарного пламени b_n :

$$r_{кр} \geq 3,7b_n \quad (4.1)$$

Это условие обеспечивает воспламенение окружающей смеси до момента остывания первоначального объёма.

Следовательно, как и для газозвушной смеси, в турбулентном потоке аэрозвеси частиц алюминия зажигание сведётся к нагреванию сферического объёма, радиус R_0 которого должен превышать характерную ширину пламени b_n .

Результаты экспериментальных исследований процесса воспламенения электрическим разрядом высокоскоростного турбулентного потока аэрозвеси частиц алюминия подробно представлены в [85-88]. Полученные методом скоростной киносъёмки результаты визуализации процесса развития начального очага зажигания в зоне рециркуляции, представлены ниже. На рисунке 4.1 показаны фрагменты киноплёнки, на которых зафиксирован процесс развития начального очага зажигания для аэрозвеси частиц алюминия марки АСД-4 в случае затухающего и распространяющегося пламени.

На кадрах киносъёмки видно, что на начальном этапе после инициирования процесса искровым разрядом происходит увеличение размера очага, затем наблюдается либо взрывной рост очага в случае распространяющегося пламени (рисунок 4.1б), либо полное угасание очага в случае затухающего пламени (рисунок 4.1а).

Для обоих сценариев, на начальном этапе, при $\tau \approx 1,6 \cdot 10^{-3}$ с, происходит формирование начального очага. Затем в случае затухающего пламени (рисунок 4.1а) размер очага за время $\tau \approx 3,2 \cdot 10^{-3}$ с практически не меняется ($R_0 \approx 1$ мм), после чего гаснет. В случае распространяющегося пламени (рисунок 4.1б) происходит резкое увеличение очага и распространение пламени по всей зоне рециркуляции при $\tau \approx 3,2 \cdot 10^{-3}$. При значении $\tau \approx 4,8 \cdot 10^{-3}$ с пламя из зоны рециркуляции распространяется в основной поток аэровзвеси.

Для обоих вариантов развития процесса воспламенения, неизменное значение размера начального очага зажигания ($R_0 \approx 1$ мм) за период времени $\tau \approx 0 \div 1,6 \cdot 10^{-3}$ с, говорит о том, что скорость роста распространяющегося пламени равна нулю, а температура в центре очага практически не изменяется [77].

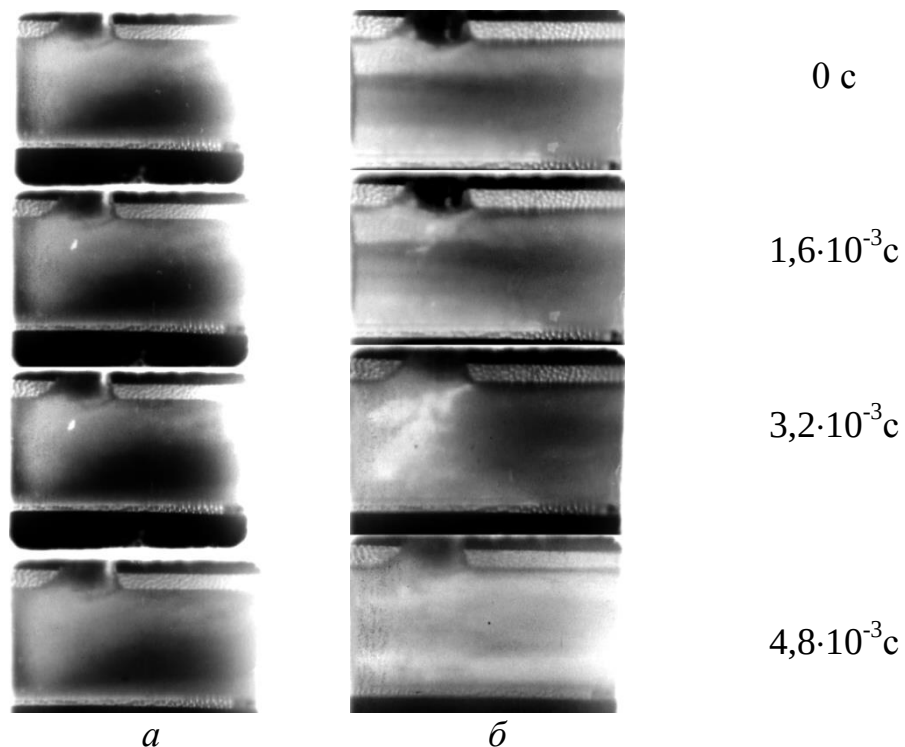


Рисунок 4.1 - Развитие начального очага зажигания для затухающего (а) и распространяющегося (б) пламени
Направление потока слева направо; АСД- 4 ($d_{32} = 7,4$ мкм);

$$U_0 = 50 \text{ м/с}; T_0 = 293 \text{ К}; D_K = 0,04 \text{ м}; \alpha = 1,1$$

Таким образом, чтобы воспламенить аэрозоль частиц алюминия порошка марки АСД-4 в зоне рециркуляции электрической искрой, критический радиус очага должен быть $R_{кр} \geq 1\text{ мм}$. При этом можно предположить, что ближайшие частицы аэрозоли успеют воспламениться прежде, чем нагретый искрой начальный очаг остынет. Учитывая, что для частиц порошка алюминия диаметром $d_{32} = 7,4\text{ мкм}$, $b_n = 2 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ [89], условие Я.Б. Зельдовича (4.1) запишем следующим образом:

$$R_{кр} \geq 0,5 \cdot b_n \quad (4.2)$$

На рисунке 4.2 представлена зависимость $R_0 = f(\tau)$ для затухающего (кривая 2) и распространяющегося (кривая 1) пламени порошка алюминия марки АСД-4. Из рисунка видно, что период индукции теплового взрыва составляет $\tau \approx 2,1 \cdot 10^{-3}\text{ с}$.

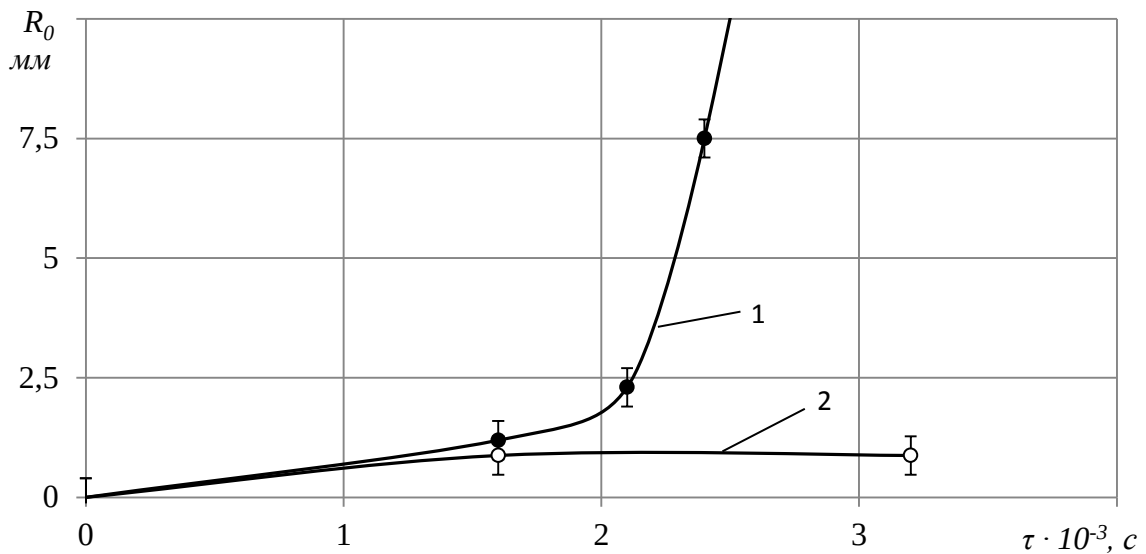


Рисунок 4.2– Зависимость $R_0 = f(\tau)$ для порошка марки АСД-4

1 - распространяющееся пламя; 2 - затухающее пламя

Определенное с использованием высокоскоростной киносъемки значение периода индукции согласуется с величиной, полученной при воспламенении аэрозоли порошка алюминия марки АСД-4 за отражёнными ударными волнами в атмосфере чистого кислорода [90].

Некоторые результаты визуализации процесса развития начального очага для аэровзвеси частиц алюминия порошка марки АСД-1 представлены на рисунках 4.3 и 4.4.

На рисунке 4.3 показаны различные варианты развития начального очага затухающего пламени.

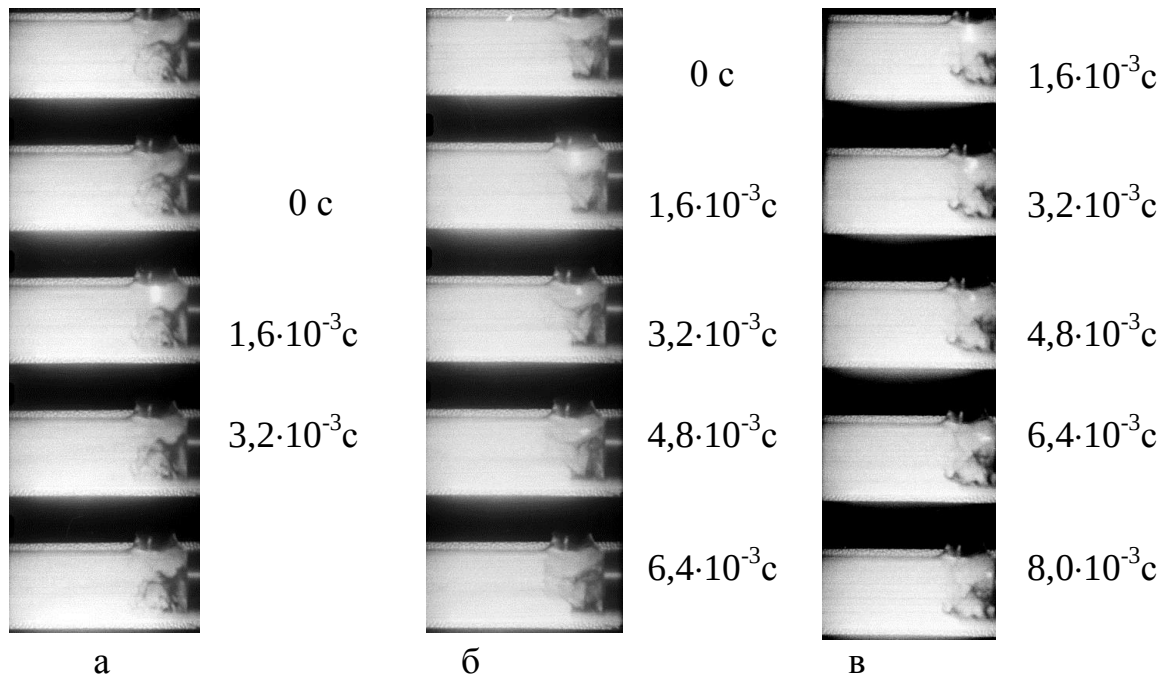


Рисунок 4.3 - Развитие начального очага при срыве зажигания

в потоке аэровзвеси порошка алюминия марки АСД-1

Время существования очага: а - $\tau_{оч} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; б - $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; в - $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}$;

скорость съемки - 600 кадр/с; направление потока справа налево;

$D_{КС} = 0,04 \text{ м}$; $U_0 = 50 \text{ м/с}$; $\alpha = 1,1$; $T_0 = 293 \text{ К}$

Из рисунка видно, что в случае срыва процесса зажигания, погасание начального очага происходит в течение экспозиции одного кадра за время $\tau \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, либо трех или пяти кадров, т.е. за время $\tau \approx 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ или $\tau \approx 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Во всех случаях, мы видим характерную закономерность, когда первоначальное увеличение очага сменяется его уменьшением с последующим погасанием.

На рисунке 4.3в, где зафиксирован наиболее продолжительный по времени вариант срыва зажигания, можно увидеть, что в начальный период процесса зажигания первоначальное увеличение очага (первый кадр сверху, $\tau \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{с}$) сменяется его уменьшением и последующим погасанием (пятый кадр сверху, $\tau \approx 8,0 \cdot 10^{-3} \text{с}$).

Аналогичная картина срыва зажигания наблюдалась в «бедных» газовоздушных смесях, когда при интенсивной турбулентности в течение значительного интервала времени $\sim 10 \cdot 10^{-3} \text{с}$ после искры происходило прекращение развития очага пламени, а иногда и его затухание [91].

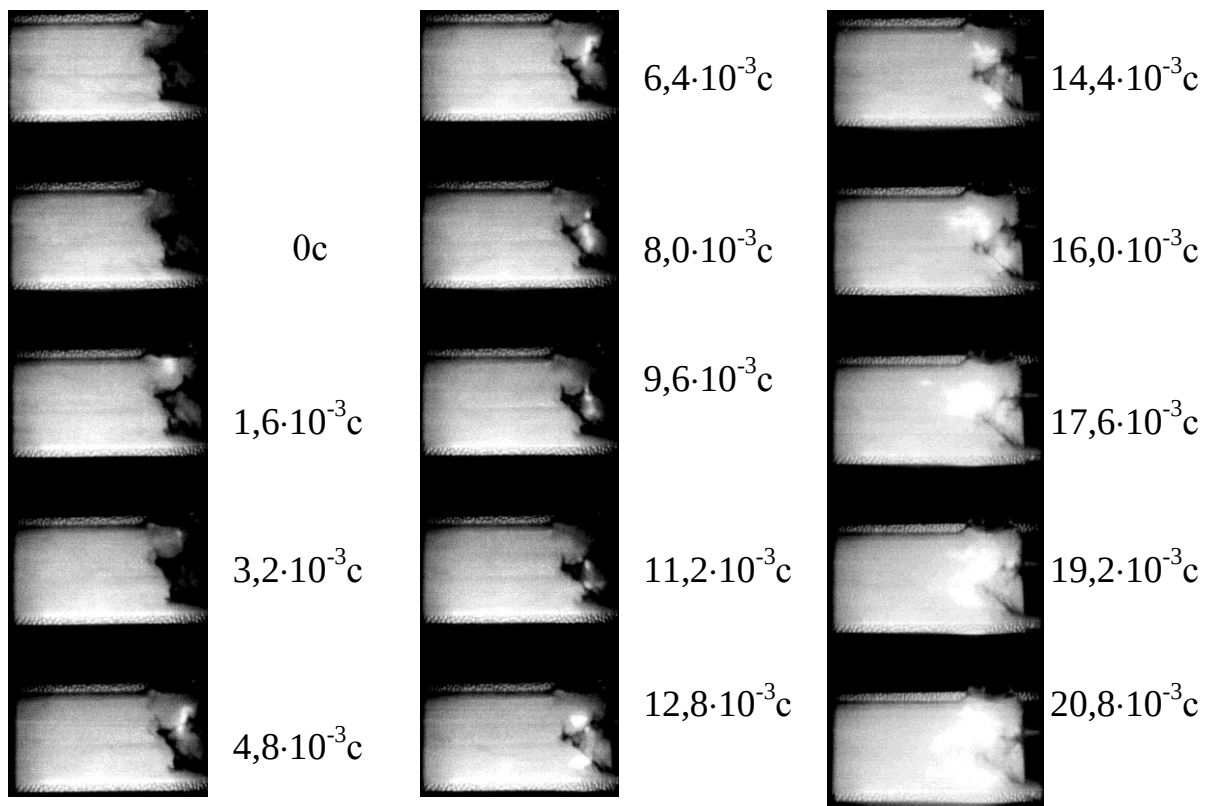


Рисунок 4.4 - Развитие начального очага распространяющегося пламени

Порошок марки АСД-1; $D_{КС} = 0,04 \text{м}$; $U_0 = 50 \text{м/с}$; $\alpha = 1,1$; $T_0 = 293 \text{К}$

скорость съемки - 600 кадр/с; направление потока справа налево

В случае успешного процесса воспламенения (рисунок 4.4) начальный очаг разогрева уменьшается ($\tau \approx 3,2 \cdot 10^{-3} \text{с}$), чему предшествовало резкое

увеличение очага после инициирования, что зафиксировано на третьем кадре сверху ($\tau \approx 1,6 \cdot 10^{-3}$ с).

На пятом кадре ($\tau \approx 4,8 \cdot 10^{-3}$ с) видно, что очаг, имеющий первоначально сферическую форму, затем под действием турбулентных пульсаций вытягивается и раздваивается. В дальнейшем процесс развития начального очага приобретает характер для установившегося распространения пламени. В донной области зоны рециркуляции появляется пламя, которое затем распространяется по всей зоне рециркуляции ($\tau \approx 20,8 \cdot 10^{-3}$ с).

Время распространения пламени в зоне рециркуляции после инициирования процесса и его распространение в основной поток составляет $\approx 25 \cdot 10^{-3}$ с.

На рисунке 4.5 представлена зависимость радиуса начального очага от времени для угасающего и распространяющегося пламени.

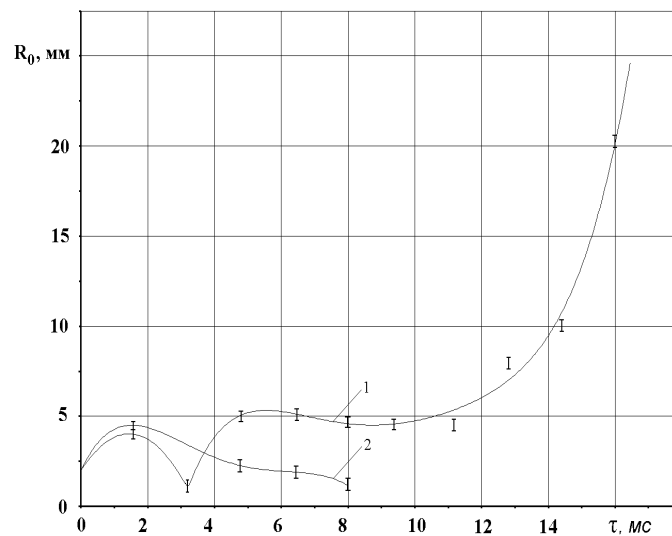


Рисунок 4.5—Зависимость $R_0 = f(\tau)$ для порошка марки АСД-1

1 - распространяющееся пламя

2 – затухающее пламя

Для обоих случаев на начальном этапе процесса в течение $\sim 1,6 \cdot 10^{-3}$ с наблюдается увеличение начального радиуса очага с $0,25 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ м. Затем в интервале времени от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $3,2 \cdot 10^{-3}$ с происходит уменьшение размеров очага до $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ м.

При значении $\tau \approx 3,3 \cdot 10^{-3}$ с в случае срыва процесса зажигания (кривая 2) первоначальное увеличение размеров очага сменяется его уменьшением, и при значении радиуса начального очага разогрева $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ м происходит его погасание $\tau \approx 8,0 \cdot 10^{-3}$ с.

При успешном развитии процесса (кривая 1), после уменьшения очага до $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ м происходит увеличение радиуса начального очага до $5 \cdot 10^{-3}$ м ($\tau \approx 4,9 \cdot 10^{-3}$ с) с последующим продолжительным периодом времени ($\tau \approx 4,9 \cdot 10^{-3} \dots 11 \cdot 10^{-3}$ с) без изменения размеров очага. Это говорит о том, что скорость роста распространяющегося пламени равна нулю, а температура в центре очага практически не меняется. Этот момент соответствует критическому состоянию очага. Такая особенность характерна для области вырожденного очагового взрыва [77].

Период индукции теплового взрыва $\tau_{\epsilon} \approx 12,8 \cdot 10^{-3}$ с для аэровзвеси частиц АСД-1 согласуется с периодом задержки воспламенения $\tau_{\epsilon} \approx 12,6 \cdot 10^{-3}$ с, полученным Р. Фридманом и А. Мачеком [92].

Таким образом, воспламенение аэровзвеси частиц алюминия порошка марки АСД-1 в зоне рециркуляции может произойти в том случае, если значение радиуса начального очага будет удовлетворять условию $R_{кр} \geq 5 \cdot 10^{-3}$ м.

Следуя тепловой теории Я.Б. Зельдовича, зажигание алюминиево-воздушной смеси искровым разрядом сведется к нагреванию сферического объема, радиус которого должен превышать характерную ширину пламени b_n , составляющую для аэровзвесей частиц алюминия $2 \cdot 10^{-3}$ м [89]. Тогда, принимая полученное в эксперименте значение $R_{кр} = 5 \cdot 10^{-3}$ м, условие обеспечения воспламенения аэровзвеси частиц алюминия марки АСД-1 в зоне рециркуляции будет определяться выражением $R_{кр} \geq 2,5 \cdot b_n$.

Результаты скоростной киносъемки показали, что пламя, инициированное электрическим разрядом свечи, в первую очередь распространяется в донной области зоны рециркуляции, где время пребывания частиц Al максимально.

Для порошка АСД-1 вначале происходит воспламенение и выгорание мелких фракций частиц Al. После того как пламя заполнит весь объем зоны рециркуляции, формируется фронт пламени в виде одного или нескольких языков, вырывающихся из зоны рециркуляции. Затем реагирующие объемы из зоны рециркуляции переносятся в основной поток аэрозвеси и создают в ней очаги горения с последующим распространением пламени по всему потоку. Время распространения пламени по зоне рециркуляции с момента воспламенения составляет 25 мс.

Результаты визуализации процесса развития начального очага и фронта пламени в зоне рециркуляции для частиц АСД-4 с $d_{32} = 7,4 \text{ мкм}$ показали, что с уменьшением диаметра частиц процесс развивается более динамично. Возникший возле свечи зажигания начальный очаг горения развивается и заполняет зону рециркуляции за 3,3 мс. Затем фронт пламени формируется вдоль «определяющей» цилиндрической поверхности (диаметр которой равен диаметру входного отверстия канала) и поджигает основной поток алюминиево-воздушной смеси.

Полученный в настоящей работе характер экспериментальной кривой зависимости $R_0 = f(\tau)$ (см. рисунок 4.5) качественно соответствует теоретической кривой зависимости температурного напора в очаге от времени $\Theta_0(\tau)$. При низких значениях Θ_0 (в нашем случае $\Theta_0 = 0,2$) вдали от условий критики до момента воспламенения очаг сужается. В окрестности δ^r очаг после некоторого сужения вновь расширяется еще до момента τ_6 , что связано с подключением реакции в окружающей очаг среде по мере ее прогрева. Такая картина развития процесса и связана с понятием вырождения критических условий при малых значениях Θ_0 [77].

С использованием материалов полученных скоростной киносъемкой по изменению объема очага V и его поверхности S была определена видимая скорость пламени $u_z = \frac{1}{S} \cdot dV/dt$ в потоке аэрозвеси с АСД-1 при $\alpha = 1,1$ (рисунок 4.6).

Известно [81], что зависимость начальной скорости распространения от диаметра очага, по-видимому, связана с нестационарным характером возбуждения процесса. В первом приближении вблизи предела $(d\zeta/dt)_{нач} = d/\delta$, где величина d слабо зависит от Θ_0 и δ , так что $(dx/dt)_{нач} = (2 \div 3) \cdot 10^3 \cdot a/d$.

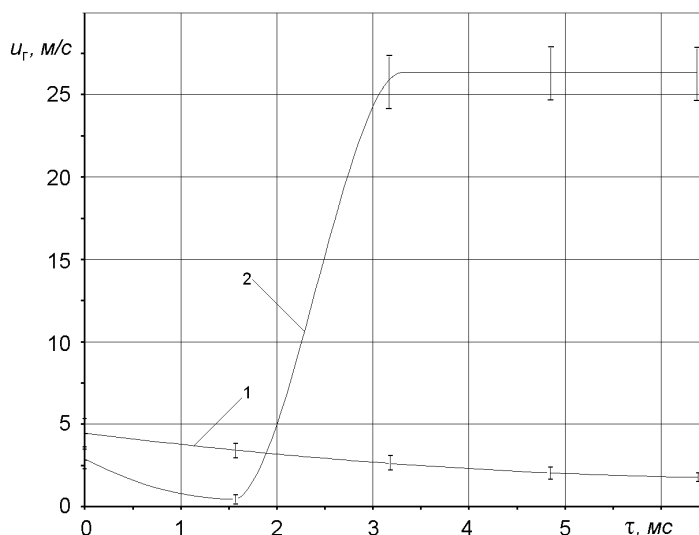


Рисунок 4.6- Изменение видимой скорости горения начального очага
1 - отказ зажигания; 2 - успешное зажигание

Используя полученные значения радиусов критического очага зажигания для порошков марки АСД-1 и АСД-4 можно в первом приближении определить начальную скорость распространения пламени по формуле [81]:

$$(dx/dt)_{нач} = (2 \div 3) \cdot 10^3 \cdot a/d \quad (4.3)$$

где a – температуропроводность воздуха ($8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$); d – диаметр очага зажигания.

Начальная скорость распространения пламени, рассчитанная по формуле (4.3) для аэровзвеси частиц алюминия марки АСД-4, составляет $80 \div 120 \text{ м/с}$. Для частиц порошка алюминия АСД-1 с $d_{32} = 7,4 \text{ мкм}$, составляет $16 \div 24 \text{ м/с}$.

Данные диапазоны скоростей распространения пламени согласуются со значениями, полученными в ходе исследования нестационарного распространения пламени аэровзвеси частиц алюминия в каналах [93].

Полученное значение радиуса критического очага можно использовать для расчета минимальной энергии искрового разряда E_{min} . Согласно Я.Б. Зельдовичу [66], создание очага горения, способного к распространению в аэровзвесах частиц алюминия так же, как и в газовоздушных смесях, будет обусловлено равенством его диаметра ширине зоны горения b_n . Соответственно, E_{min} должна обеспечить нагрев определённого объёма аэровзвеси радиусом $R_{кр}$ от начальной температуры T_0 до температуры горения T , пропорционально ширине фронта пламени [66]

$$E_{min} = b_n^3 \cdot c_p \cdot \rho \cdot (T - T_0) \quad (4.4)$$

где, c_p – теплоёмкость аэровзвеси при постоянном давлении; ρ – плотность аэровзвеси частиц алюминия (1782 кг/м³) [4].

Расчёт минимальной энергии по формуле (4.4) показал, что для воспламенения аэровзвеси частиц алюминия марки АСД-4 минимальное значение энергии искры должно составлять 0,025Дж, что соответствует экспериментально полученному значению энергии воспламенения порошка алюминия с размером частиц соответствующим порошку марки АСД-4 [94].

Таким образом, первоначально выбранная нами свеча зажигания СПН-4-3Т с величиной энергии искрового разряда $W = 0,05$ Дж, обеспечит надёжное зажигание потока аэровзвеси частиц с АСД-4 и АСД-1.

4.2 Влияние турбулентности на развитие начального очага

Поведение начального очага зависит от того, будет ли скорость выделения тепла в процессе горения превосходить скорость теплоотвода в окружающую среду вследствие излучения и турбулентной диффузии. Поскольку теплоотвод от очага осуществляется посредством турбулентной диффузии, а его интенсивность определяется величиной пульсационной

скорости, необходимо установить влияние начальной турбулентности на процесс развития начального очага в зоне рециркуляции.

В отличие от однородной смеси в гетерогенной алюминиево-воздушной смеси воздействие интенсивности турбулентности на развитие пламени начального очага имеет свои особенности. Поведение твердых частиц в турбулентных потоках является сложным физическим процессом, механизм реализации которого зависит как от концентрации частиц в потоке, так и от их размера. Природа влияния массы твердых частиц на газообразный поток сложна, частицы могут выступать как своеобразные дискретные детурбулизаторы и как дестабилизаторы [95]. Установка в потоке турбулизирующей решётки для увеличения ε_0 при определении границ зажигания ещё более осложняет это влияние.

Влияние турбулентности на динамику развития начального очага для порошка марки АСД-4 представлено на рисунке 4.7.

Из рисунка видно, что процесс развития начального очага в зоне рециркуляции для аэровзвеси частиц алюминия марки АСД-4 протекает в две стадии. При трубной турбулентности (5%) на первой стадии развития темпы роста начального очага в течение первых $\approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ с ниже, чем с повышенной турбулентностью при установке решётки.

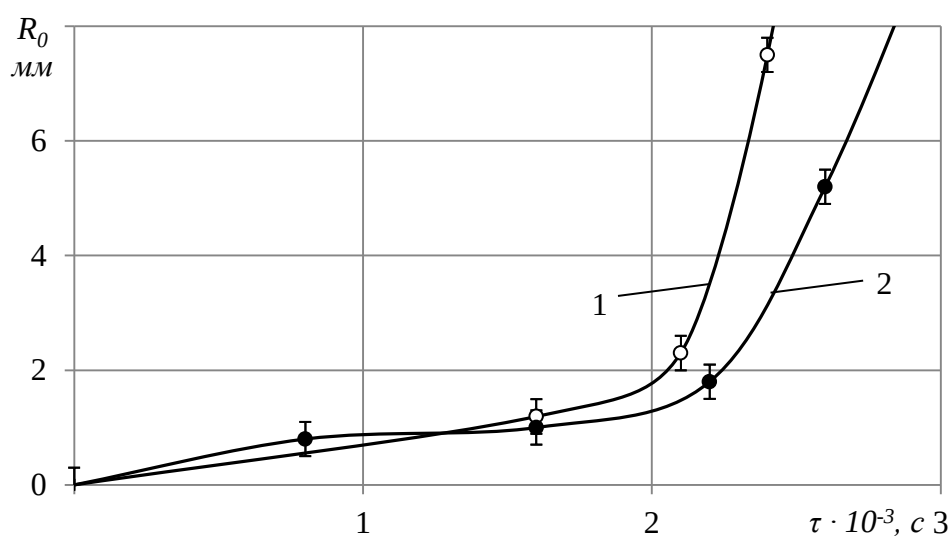


Рисунок 4.7 - Влияние турбулентности потока аэровзвеси на развитие очага.

Порошок марки АСД-4; кривая 1 - $\varepsilon = 5\%$; кривая 2 - $\varepsilon = 22\%$

На второй стадии развития $\approx 1,5 \div 3 \cdot 10^{-3}$ с темпы роста очага при трубной турбулентности выше, чем в опытах с повышенной турбулентностью при установке решётки.

Для устранения влияния частиц алюминия на турбулентность несущего воздушного потока были проведены испытания с отдельной подачей компонентов аэрозвеси в камеру сгорания. Частицы алюминия подавались непосредственно в зону рециркуляции, а воздушный поток, начальная турбулентность которого варьировалась посредством установки решётки, через входное отверстие камеры сгорания.

На рисунке 4.8 показано влияние интенсивности турбулентности воздушного потока на динамику роста начального очага зажигания для порошка марки АСД-1.

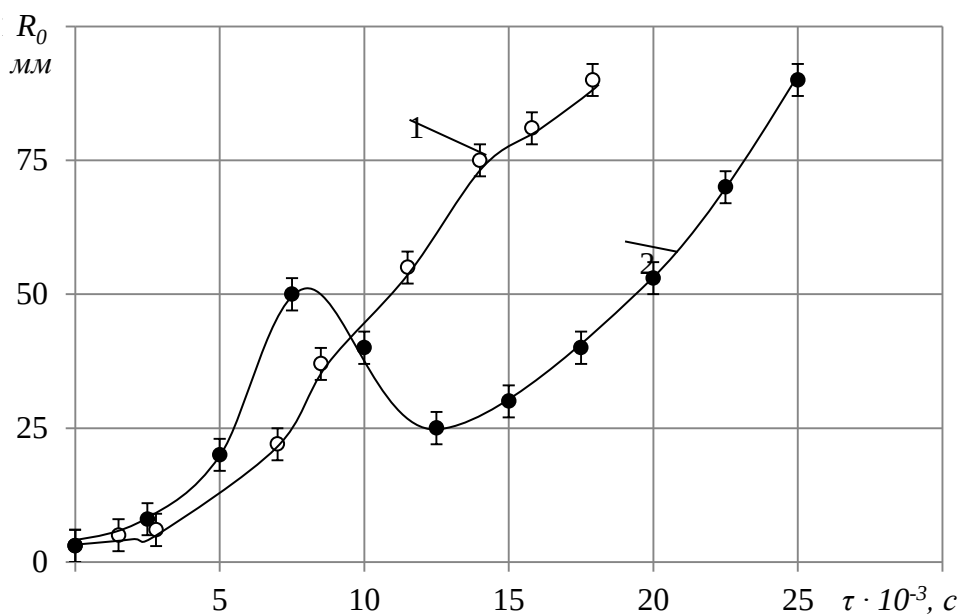


Рисунок 4.8 - Влияние турбулентности воздушного потока на развитие начального очага.

Порошок марки АСД-1; кривая 1 - $\varepsilon = 5\%$; кривая 2 - $\varepsilon = 22\%$

Как видно из рисунка, в течение первой фазы ($\tau \approx 9,0 \cdot 10^{-3}$ с) темпы роста очага при установке решёток выше, чем при трубной турбулентности. Во второй фазе ($\tau \approx 9,0 \div 27 \cdot 10^{-3}$ с) темпы роста очага с увеличением

интенсивности турбулентности (с установкой решётки) становятся ниже, чем при трубной турбулентности, что обусловлено усилением теплоотвода от начального очага разогрева.

Таким образом, процесс развития начального очага в зоне рециркуляции происходит в две стадии. Первая стадия, когда скорость выделения тепла в процессе химической реакции превосходит скорость теплоотвода в окружающую среду и составляет $\sim 1/3$ от общего времени развития очага.

Увеличение турбулентности потока аэровзвеси оказывает положительное влияние на размеры начального очага зажигания в зоне рециркуляции на первой стадии развития и отрицательно на второй.

Анализируя рисунки 4.6 и 4.7 видно, что варьируя начальной турбулентностью потока аэровзвеси содержащей порошок АСД-4 или АСД-1, качественно характер влияния турбулентности на динамику развития начального очага не изменился.

4.3 Границы зажигания в потоке аэровзвеси частиц алюминия

Для надёжного воспламенения аэровзвеси поступающей в форкамеру необходимо было определить границы устойчивого зажигания высокоскоростного потока алюминиево-воздушной смеси в камере с внезапным расширением.

Известно [96, 97], что параметры потока аэровзвеси такие как: расход порошка алюминия и воздуха; начальная скорость и турбулентность потока аэровзвеси; температура воздуха; размеры и форма частиц алюминия влияют на процесс воспламенения. Поэтому установление границ вынужденного зажигания сводится, по существу, к выяснению влияния каждого из этих факторов на границы зажигания.

Ниже представлены результаты исследования влияния некоторых из названных факторов на границы воспламенения потока аэровзвеси частиц

алюминия в форкамере с внезапным расширением. Для этого была применена методика испытаний, по которой определяется область воспламенения горючей смеси в камерах сгорания авиационных газотурбинных двигателей [63].

Начальные параметры, при которых проводились испытания, сведены в таблицу 4.1.

На рисунке 4.9 показана область зажигания потока аэровзвеси содержащая частицы АСД-4. На графике ось ординат $\chi = G_{Al}/G_B$ это отношение расхода порошка алюминия к расходу воздуха, а ось абсцисс G_B - расход воздуха.

Таблица 4.1-Начальные параметры потока аэровзвеси для камеры сгорания диаметром 0,05 м.

Марка порошка алюминия	Средний диаметр частиц Al d_{32} мкм	Диаметр камеры, $D_{кс}$, м	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход порошка G_{Al} , г/с	Расход Воздуха G_B , г/с	Относительный расход χ
1	2	3	4	5	6	7
АСД-4	7,4	0,05	5	17,34	10,2	1,7
				7,7	11	0,7
				1,183	8,45	0,14
				0,8325	9,25	0,09
				1,996	9,98	0,2
				3,57	11,9	0,3
				5,5968	11,66	0,48
				9,5337	9,63	0,99

Согласно Я.Б. Зельдовичу [66], в связи с отводом тепла через стенки трубы (или активных центров на стенки) концентрационные границы будут уменьшаться, это влияние будет определяющим, когда диаметр трубы соизмерим с шириной ламинарного фронта пламени b_n .

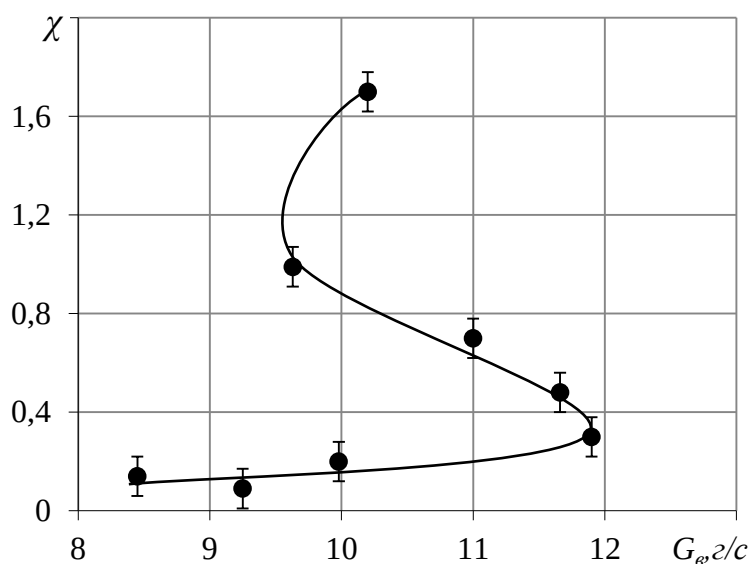


Рисунок 4.9 - Область зажигания в потоке аэровзвеси частиц АСД-4

$$D_K = 0,05\text{м}; T_0 = 293\text{К}; P_0 = 0,1 \text{ МПа}$$

Для углеводородо-воздушных смесей стехиометрического состава при нормальном давлении и температуре 100°C значения предельных диаметров колеблются в интервале $1,67 \dots 1,85$ мм [65]. С увеличением диаметра трубы влияние стенок ассимптотически уменьшается.

В результате определения пределов воспламенения в потоке аэровзвеси частиц алюминия в камерах с внезапным расширением было установлено минимальное значение характерного размера $H = 0,014$ м, диаметра $D_K = 0,027$ м и начальной скорости потока $U_0 = 40 \text{ м/с}$ на входе в камеру сгорания, меньше которых надежного зажигания не происходило.

Для определения влияния диаметра камеры сгорания на границы воспламенения были проведены испытания в камерах сгорания диаметром $0,04$ и $0,05$ м.

Начальные параметры потока аэровзвеси частиц алюминия, при которых проводились испытания, представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Начальные параметры потока аэровзвеси для камеры сгорания диаметром 0,04 м.

Марка порошка алюминия	Средний диаметр частиц Al d_{32} , мкм	Диаметр камеры, $D_{КС}$, м	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход порошка G_{Al} , г/с	Расход Воздуха G_B , г/с	Относительный расход χ
1	2	3	4	5	6	7
АСД-4	7,4	0,04	5	6,63	10,2	0,65
				17,595	10,35	1,7
				7,824	9,78	0,8
				4,494	10,7	0,42
				2,943	10,9	0,27
				0,5489	9,98	0,055
				0,266	9,5	0,028
				0,222	9,25	0,024

На рисунке 4.10 показано влияние диаметра камеры с внезапным расширением D_K на границы воспламенения в потоке аэровзвеси с АСД-4.

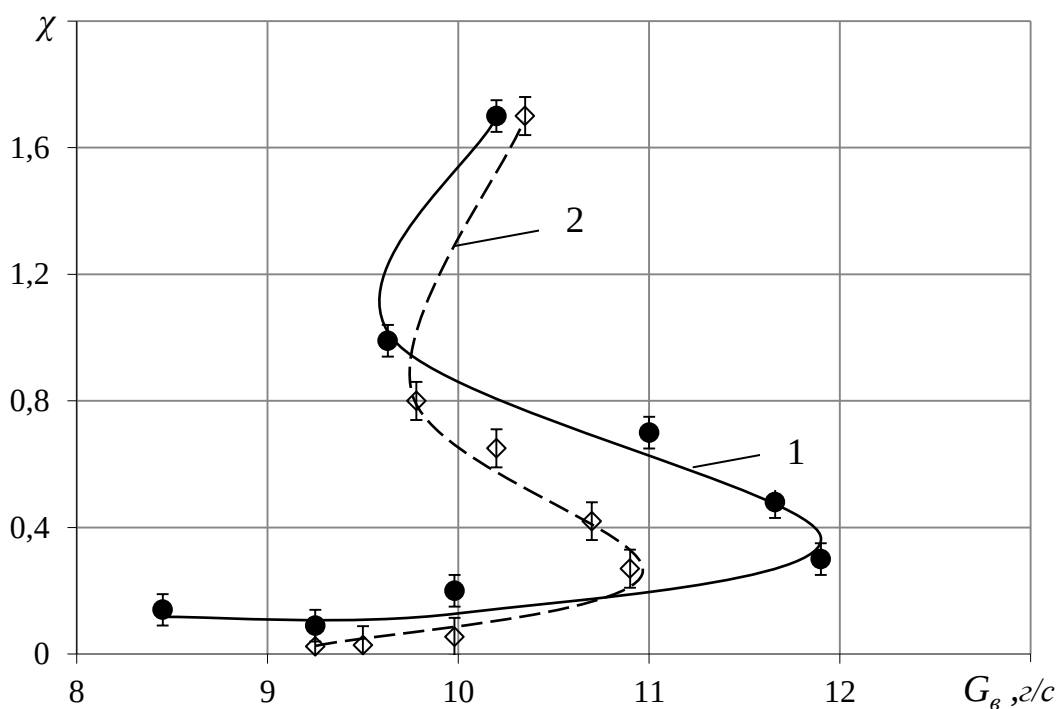


Рисунок 4.10 - Влияние диаметра канала на границы зажигания АСД-4

1 — $D_K = 0,05$ м; 2 — $D_K = 0,04$ м; $T_0 = 293$ К; $P_0 = 0,1$ МПа

Из рисунка видно, что в камере меньшего диаметра зажигание происходит при меньших значениях относительного расхода χ , поскольку с

уменьшением диаметра канала увеличивается объемная концентрация частиц алюминия в зоне рециркуляции, в связи с чем, снижается температура воспламенения и увеличивается скорость горения. С увеличением диаметра камеры объемная концентрация частиц в зоне рециркуляции уменьшается, а соответственно температура и скорость горения. Поэтому с увеличением диаметра канала область зажигания смещается в сторону больших значений χ .

Характеристики искрового зажигания зависят от того, покоится или движется горючая смесь, а также от наличия или отсутствия турбулентности. Как показывают результаты экспериментов, с увеличением скорости потока энергия искры, необходимая для зажигания смеси, возрастает, иначе говоря, воспламеняемость горючей смеси снижается [18].

В связи с этим необходимо было установить влияние скорости потока аэровзвеси на пределы зажигания. На рисунке 4.11 представлено влияние скорости потока на границы зажигания аэровзвеси частиц порошка АСД-1.

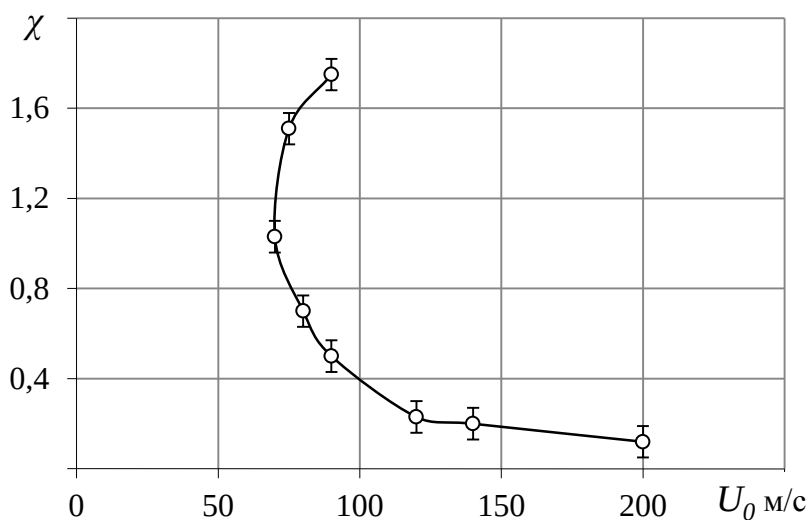


Рисунок 4.11 - Влияние скорости потока аэровзвеси на границы зажигания

$$D_K = 0,033\text{м}; T_0 = 293\text{К}; P_0 = 0,1 \text{ МПа}$$

Из рисунка видно, что максимальная скорость потока аэровзвеси, при которой происходит воспламенение, наблюдается при значении

относительного расхода $\chi > 1,8$. Это значение относительного расхода, соответствует коэффициенту избытка воздуха $\alpha \approx 0,1 \div 0,2$, при котором процесс образования нитрида алюминия (AlN_K) вносит существенный вклад в суммарное тепловыделение и поддерживает устойчивое воспламенение обедненной кислородом смеси [18].

Начальные параметры, при которых проводились испытания, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3-Начальные параметры потока аэровзвеси для камеры сгорания диаметром 0,033 м.

Марка порошка алюминия	Средний диаметр частиц Al $d_{32\text{мкм}}$	Диаметр камеры, $D_{\text{КС}}$, м	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход Воздуха G_B , г/с	Скорость воздуха U_0 , м/с	Расход порошка G_{Al} , г/с	Относительный расход χ
1	2	3	4	5	6	7	8
АСД-1	17,4	0,033	5	18,94	121	36	1,9
				16	90	28	1,75
				16,55	75	25	1,51
				21,35	70	22	1,03
				28,57	80	20	0,7
				30	110	18	0,6
				83,33	200	10	0,12
				104,34	120	24	0,23
				105	140	21	0,2
				16,66	150	30	1,8
				11	185	22	2

Поведение твердых частиц в турбулентных потоках является сложным физическим процессом, механизм реализации которого зависит как от концентрации частиц в потоке, так и от их размера. Выше уже было отмечено, что природа влияния массы твердых частиц на газообразный поток сложна. Установка в потоке решётки для увеличения ε_0 при определении границ зажигания ещё более осложняет это влияние.

Материалы киносъемки при искровом зажигании потока аэровзвеси частиц алюминия АСД-4 показали, что, с ростом начальной турбулентности очаг воспламенения под действием пульсаций раздваивается. Затем «языки»

пламени выносятся в основной поток и там гаснут, тем самым, увеличивая время зажигания основного потока аэровзвеси.

Для аэровзвеси содержащей частицы АСД-1 наоборот, увеличением начальной турбулентности благоприятно влияет на развитие процесса воспламенения и горения в зоне рециркуляции.

В экспериментах по определению влияния турбулентности на пределы воспламенения варьировалось расстояние установки решеток до плоскости внезапного расширения l_p , а соответственно и расстояние их от свечи зажигания.

Начальные параметры потока аэровзвеси частиц алюминия, при которых проводились испытания, представлены в таблицах 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4- Начальные параметры потока аэровзвеси при установке решетки на $l = 0,057$ м.

Марка порошка алюминия	Средний диаметр частиц $Al d_{32}$, мкм	Диаметр камеры $D_{кс}$, м	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход Воздуха G_B , г/с	Скорость воздуха U_0 , м/с	Расход порошка G_{Al} , г/с	Относительный расход χ
1	2	3	4	5	6	7	8
АСД-1	17,4	0,06	12	14	43	2,1	0,15
				15,5	55	7,75	0,5
				19	64	16,15	0,85
				22	85	48,4	2,2
				21,5	72	51,6	2,4
				15	57	36	2,4

Влияние начальной скорости U_0 и турбулентности ε_0 потока аэровзвеси частиц алюминия на границы зажигания в камере сгорания диаметром 0,06 м. показан на рисунке 4.12.

Таблица 4.5- Начальные параметры потока аэровзвеси при установке решетки на $l=0,02$ м.

Марка порошка алюминия	Средний диаметр частиц Al d_{32} , мкм	Диаметр камеры $D_{КС}$, м	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход Воздуха G_B , г/с	Скорость воздуха U_0 , м/с	Расход порошка G_{Al} , г/с	Относительный расход χ
1	2	3	4	5	6	7	8
АСД-1	17,4	0,06	22	19,5	40	2,925	0,15
				25	47	8,75	0,35
				25	57	23,75	0,95
				15	65	18	1,2
				16,5	66	25,575	1,55
				74	55	130,98	1,77
				23	50	41,4	1,8

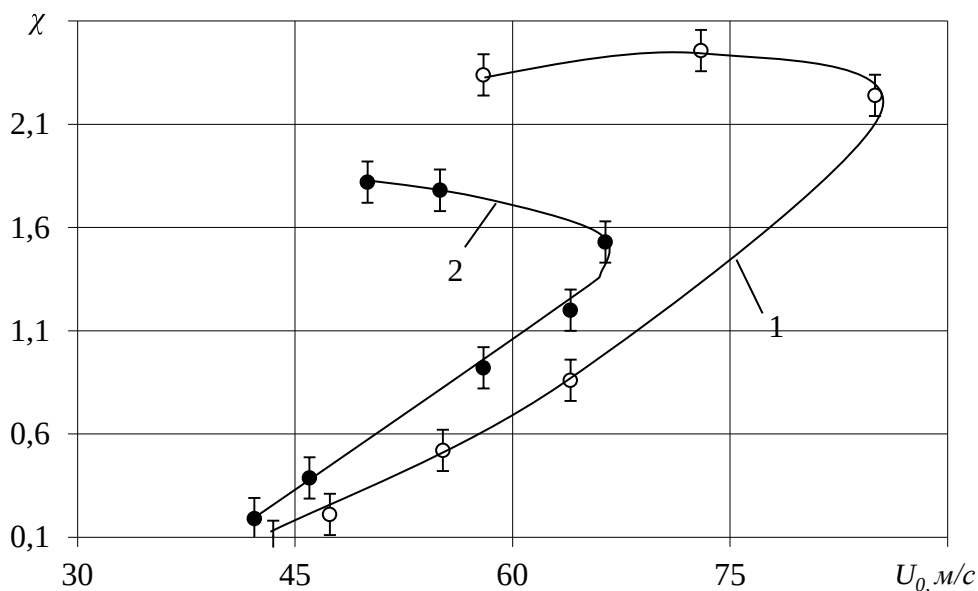


Рисунок 4.12- Влияние U_0 и ε_0 на границы зажигания алюминия марки АСД-1

$$D_K = 0,05\text{м}; T_0 = 293\text{К}; P_0 = 0,1 \text{ Мпа}$$

1 - с решеткой на $l_p = 0,02\text{м}$ ($\varepsilon_0 = 22\%$);

2 - с решеткой на $l_p = 0,057\text{м}$ ($\varepsilon_0 = 12\%$)

Из рисунка видно, что с ростом начальной турбулентности границы зажигания в потоке аэровзвеси с АСД-1 расширяются.

Также было установлено, что в аэровзвеси, содержащей частицы АСД-4 с $d_{32} = 7,4\text{мкм}$, рост начальной турбулентности приводит к сужению пределов воспламенения.

Важнейшей характеристикой порошкообразных металлических горючих является размер частиц. Для большинства промышленных порошков алюминия характерно интегральное распределение частиц по размерам [50].

Характеристики воспламенения в энергетических установках, работающих на порошкообразном алюминии, зависят главным образом от присутствия частиц мелких фракций вблизи свечи зажигания и в первичной зоне горения на протяжении периода запуска. Поэтому влияние размера частиц на характеристики воспламенения приобретает первостепенное значение.

На рисунке 4.13 представлена зависимость $\chi = f(d_{32})$ на границу пределов воспламенения в потоке аэрозвеси, содержащей частицы алюминия сферической формы.

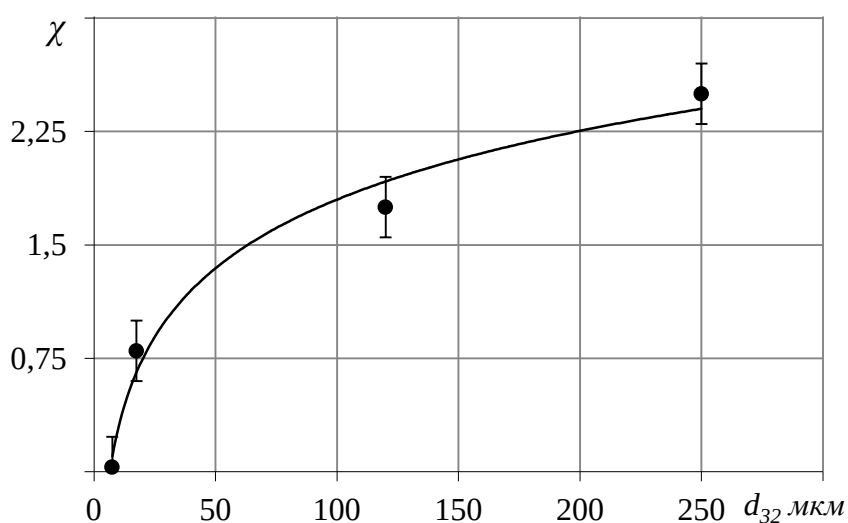


Рисунок 4.13 - Зависимость $\chi = f(d_{32})$

Такой характер зависимости $\chi = f(d_{32})$ обусловлен тем, что тепловые и диффузионные потоки в системе обратно пропорциональны размеру сгорающей частицы, а время сгорания пропорционально размеру сгорающей частицы в степени $1,5 \div 2$ [4, 22].

Таким образом, границы зажигания в потоке аэровзвеси частиц алюминия с уменьшением диаметра сферических частиц алюминия расширяются.

В таблицах 4.6 и 4.7 представлены начальные параметры потока аэровзвеси для получения обобщенных данных по границам воспламенения.

При гомогенном горении зависимость скорости пламени от начальной температуры горючей смеси обычно близка к квадратичной, а в газовзвесах в интервале температур 250...550 К эта зависимость значительно слабее. Однако с приближением начальной температуры к температуре самовоспламенения частиц алюминия тория предсказывает резкое усиление зависимости. Косвенно это подтверждается экспериментально увеличением частоты проскоков пламени, при попытке расширения исследованного диапазона начальных температур взвеси [26].

Таблица 4.6- Начальные параметры потока аэровзвеси для камер сгорания диаметром 0,04 и 0,07 м

Диаметр камеры сгорания D_K , м	Средний диаметр частиц Al , d_{32} мкм	Начальная температура T_0 , K	Начал ьная турбул ентнос ть ε_0 , %	Расход Воздуха G_B г/с	Расход порошка G_{Al} г/с	Относи тельны й расход χ	Скорость воздуха U_0 , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
0,05	17,4..7,4	293	5	20	3	0,15	46
				19,5	25,66	1,3159	45
				16	4	0,25	45
				19,5	31	1,58974	42
0,08			22	36,6	3,98	0,10874	26,6
				29,9	5	0,16722	26
				30,6	9	0,29412	25

Таблица 4.7- Начальные параметры потока аэровзвеси для камеры сгорания диаметром 0,08 м

Диаметр камеры сгорания D_K , м	Средний диаметр частиц Al, d_{32} мкм	Началь ная темпер атура T_0, K	Начальн ая турбуле нтность ε_0 , %	Расход воздуха G_B г/с	Расход порошка G_{Al} г/с	Относитель ный расход χ	Скорость воздуха U_0 , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
0,06	17,4..7,4	293	5	14	84	6	107
				18	88	4,88	103
				19	61,1	3,21	103
				22	36,27	1,64	99
				19,5	62	3,17	96
				20	68,16	3,40	88
				15	63,1	4,20	83
				20,5	28	1,36	77
				24,5	67,43	2,75	77
				36	23,5	0,65	73
				36	4,3	0,11	71
0,07			12	25	22,3	0,89	59
				23	21,5	0,938	57
				27	19,5	0,72	57
				26	57,2	2,2	56
				34	20,44	0,60	52
				29	21,3	0,73	50
				34	3,56	0,10	49

Обобщенная область воспламенения потока аэровзвеси частиц алюминия в камерах сгорания $D_K = 40 \div 80$ мм представлена на рисунке 4.14. Как видно из рисунка кривая зависимости $\chi = f(G_B)$ имеет два максимума при значениях $\chi \approx 2,1$ и $\chi \approx 0,27$, что соответствует «богатому» ($\alpha \approx 0,12$) и стехиометрическому ($\alpha \approx 1$) составу смеси. Воспламенение аэровзвеси частиц алюминия при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 0,12$ происходит за счёт реакции азотирования [1], когда молекулы азота замещают молекулы кислорода в процессе окисления.

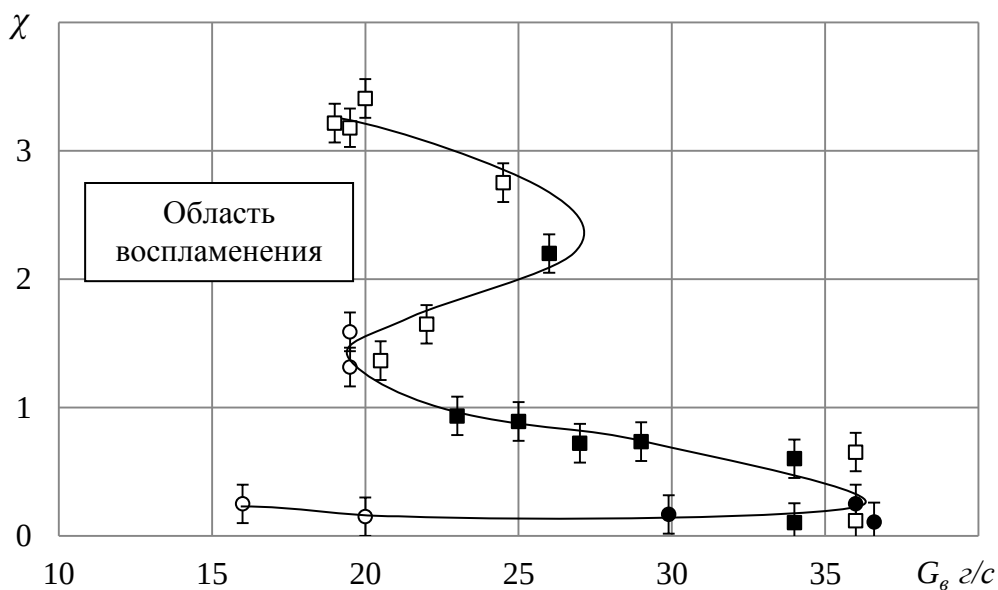


Рисунок 4.14 – Область воспламенения потока аэрозвеси частиц алюминия

■ - $D_K = 70$ мм □ - $D_K = 60$ мм ● - $D_K = 80$ мм ○ - $D_K = 50$ мм

При стехиометрическом составе смеси воспламенение происходит за счёт насыщения зоны реакции кислородом воздуха.

Полученный характер кривой, представленный на рисунке 4.14, подтверждается результатами термодинамического расчёта [1].

4.4 Выводы

1. Экспериментально получены значения периода индукции теплового взрыва $\tau_{\theta} \approx 12,8 \cdot 10^{-3}$ с для аэрозвеси частиц АСД-1 и $\tau_{\theta} \approx 2,1 \cdot 10^{-3}$ с для АСД-4, которые хорошо согласуются со значениями этих величин, полученными другими авторами.

2. Определен критический радиус начального очага зажигания $R_{кр} \geq 1$ мм для порошка алюминия АСД – 4 и условие воспламенения $R_{кр} \geq 0,5 \cdot b_n$, а также критический радиус начального очага зажигания $R_k \geq 5$ мм для порошка алюминия АСД – 1 и условие воспламенения $R_{кр} \geq 2,5 \cdot b_n$

3. Полученные значения радиусов критического очага зажигания позволяют в первом приближении определить начальную скорость распространения пламени по формуле

$$(dx/dt)_{нач} = (2 \div 3) \cdot 10^3 \cdot a/d$$

где a – температуропроводность воздуха ($8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$); d – диаметр очага зажигания

4. Установлены минимальные значения характерного размера

$H = 0,014 \text{ м}$, диаметра $D_K = 0,027 \text{ м}$ и начальной скорости потока аэровзвеси $U_0 = 40 \text{ м/с}$, при которых воспламенение в форкамере с внезапным расширением не происходило.

5. Выявлены закономерности и особенности развития начального очага. Для обеспечения надежного зажигания высокоскоростного турбулентного потока аэровзвеси в камере сгорания необходимо создать условия для возникновения начального очага около свечи, переброса пламени в зону рециркуляции и воспламенение аэровзвеси в зоне обратных токов с последующим распространением пламени в основной поток аэровзвеси.

6. Установлено, что границы зажигания в потоке аэровзвеси расширяются при уменьшении диаметра камеры сгорания, уменьшении среднего размера частиц алюминия и сужаются при увеличении скорости потока. С увеличением начальной турбулентности границы зажигания в потоке аэровзвеси с частицами АСД-4 сужаются и расширяются - с частицами АСД-1.

5 СТАБИЛИЗАЦИИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

5.1 Исследование механизма стабилизации пламени

Для большинства горелочных устройств, где имеет место турбулентное течение горючего и окислителя, скорость на входе в камеру сгорания, значительно больше, чем скорость распространения пламени. В связи с этим, для поддержания стационарного распространения пламени необходимо наличие постоянного источника поджигания. Чаще всего практикуется стабилизация пламени аэродинамической стабилизацией, основанной на создании за телом плохобтекаемой формы или в канале с внезапным расширением зоны рециркуляции (ЗР), которая является источником постоянного подвода тепла для свежей горючей смеси [64].

В общем случае, стабилизация пламени осуществляется за счёт взаимодействия основного потока горючей смеси с ЗР, при котором поддерживается баланс между количеством теплоты, необходимым для зажигания основного потока горючего и количеством теплоты, передаваемым из ЗР. Аэродинамическая стабилизация пламени подразумевает зажигание свежей смеси от стационарного источника поджигания в области, где имеет место равенство скоростей набегающего потока свежей смеси и распространения пламени.

На рисунке 5.1 представлена схема аэродинамической стабилизации пламени в канале с внезапным расширением [98].

При скорости набегающего потока U_0 устойчивое распространение пламени будет происходить до тех пор, пока не нарушится условие равенства скоростей набегающего потока U_0 и распространения фронта пламени U_f :

$$U_0 = U_f \quad (5.1)$$

При $U_0 < U_f$ будет наблюдаться проскок пламени, а при $U_0 > U_f$ происходить срыв пламени.

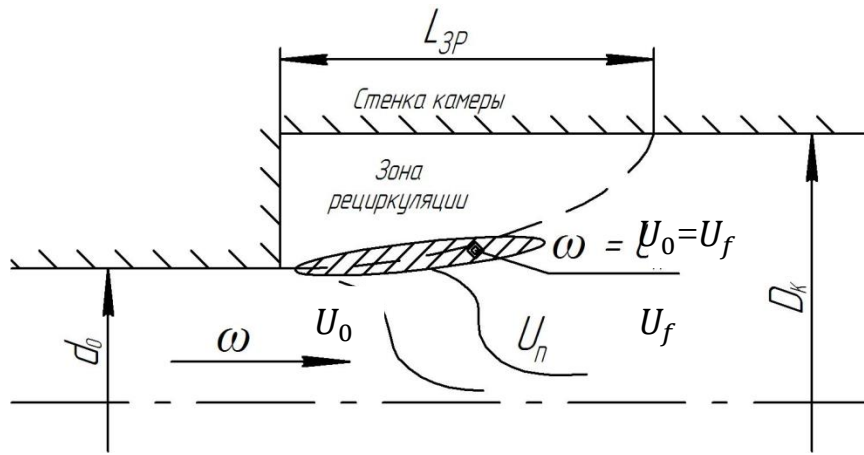


Рисунок 5.1 - Схема аэродинамической стабилизации пламени
в канале с внезапным расширением

Теория стабилизации пламени, предложенная В.Ф. Дунским, основана на учёте соотношения между временем соприкосновения элементарных объёмов свежей смеси с продуктами сгорания ЗР, то есть временем контакта τ_k свежей смеси с ЗР и временем задержки воспламенения τ_{en} , необходимым для нагрева смеси до температуры воспламенения. Стабильное распространение пламени будет наблюдаться при соотношении $\frac{\tau_k}{\tau_{en}} \geq 1$.

Ниже представлены результаты исследования механизма стабилизации пламени в высокоскоростном потоке аэрозвеси частиц алюминия на основе вышеупомянутой контактной модели.

В [2] установлены основные факторы, воздействующие на аэродинамику потока алюминиево-воздушной смеси, и выявлены закономерности влияния каждого фактора: диаметра частиц порошка алюминия; геометрических размеров канала с внезапным расширением D_K , d_0 ; скорости набегающего потока горючей смеси U_0 . Факторами, определяющими τ_k , являются: длина ЗР $L_{ЗР}$, диаметр частицы порошка d_{32} и скорость набегающего потока U_0 . Размер ЗР является функцией от геометрических параметров канала с внезапным расширением $L_{ЗР} = f(D_K; d_0)$ [99]. С ростом степени расширения канала D_K / d_0 , происходит увеличение

длины ЗР, что способствует повышению времени контакта. Увеличение диаметра частиц алюминия, вследствие большей инерционности, также приводит к повышению τ_k .

Поскольку τ_k зависит от скорости, с которой движется частица, и длины ЗР, следовательно, с увеличением скорости набегающего потока горючей смеси τ_k уменьшается [100].

Изменение траектории движения частиц, вследствие соударения друг с другом, незначительно влияет на τ_k поэтому влиянием концентрационного состава смеси на время контакта, можно пренебречь.

Учитывая влияние каждого фактора на τ_k , была получена формула:

$$\tau_k = \frac{d_q}{U_0 \cdot K} \cdot \left(1 - \frac{d_0}{D_K}\right), \quad (5.2)$$

где $K = 3,3 \cdot 10^{-5}$ для порошка марки АСД-1; $K = 2,0 \cdot 10^{-5}$ для порошка марки АСД-4.

Время прогрева частиц металла от начальной температуры, при которой начинается выполняться указанное условие, и определяет время задержки воспламенения. Основными параметрами, определяющими время задержки воспламенения одиночной частицы алюминия в продуктах сгорания гетерогенных конденсированных систем, является температура газового потока и гранулометрический состав порошка алюминия.

Известно [22], что для одиночной частицы алюминия прогрев от начальной температуры T_0 до критической температуры T_n^{kp} (близкой к точке плавления окиси алюминия) осуществляется теплопроводностью от среды с температурой T_n в тонком пограничном слое, окружающем частицу. Выражение для времени задержки воспламенения запишется в виде

$$\tau_{en}^0 = 3,33 \cdot \frac{c_m \cdot \rho_m}{\lambda_g} \cdot \frac{R^2}{1 + 0,27 \cdot Re^{0,5}} \cdot \ln \left[\frac{T_{II} - T_0}{T_{II} - T_{II}^{kp}} \right], \quad (5.3)$$

где ρ_m - плотность частицы; c_m - удельная теплоёмкость частицы; R - радиус частицы; λ_g - теплопроводность газа; Re - число Рейнольдса; T_{II} - температура среды.

Например, для частицы алюминия с $d_{32} = 17,4$ мкм при скорости потока $U_0 = 70$ м/с время задержки воспламенения будет составлять 3,42 мс. С учётом того, что время воспламенения потока аэрозвеси τ_{en} зависит от физико-химического состава частиц алюминия и концентрации частиц в зоне реакции, при этом τ_{en} смеси будет меньше по отношению ко времени воспламенения одиночной частицы алюминия τ_{en}^0 за счёт диффузионного теплообмена между частицами. Тогда уравнение для τ_{en} смеси запишется в виде

$$\tau_{en} = \tau_{en}^0 \cdot [(\alpha - 1,1)^2 + 1], \quad (5.4)$$

По условию стабилизации время контакта частиц алюминия с ЗР τ_k , должно быть больше времени задержки воспламенения τ_{en} , при различных значениях скорости потока и состава аэрозвеси. Тогда для фиксированных значений параметров канала с внезапным расширением при однородном физико-химическом составе порошка алюминия τ_k , будет являться, функцией скорости потока U_0 ; а τ_{en} функцией скорости потока и состава смеси α . На основании выше изложенного, запишем граничное условие срыва пламени алюминиево-воздушной смеси:

$$\tau_k(U_0) = \tau_{en}(\alpha; U_0), \quad (5.5)$$

В [99] установлено, что длина ЗР при холодных продувках в 1,4 раза меньше, чем в случае с горением алюминиево-воздушной смеси при равных прочих условиях. Основываясь на данных работы [2] о зависимости скорости срыва пламени от состава смеси в диапазоне изменения $0,5 < \alpha < 2,5$, с использованием полученной длины ЗР методом холодных продувок были получены пределы стабилизации высокоскоростного потока алюминиево-

воздушной смеси в виде зависимости $\tau(\alpha)$; где τ – это граничное время, при котором $\tau_k = \tau_{en} = \tau$.

На рисунке 5.2 представлена зависимость τ_k от состава смеси в момент срыва пламени. Как видно из рисунка при стехиометрическом составе, τ_k , принимает минимальное значение, которое достаточно для воспламенения потока аэрозвеси. При отклонении значений коэффициента избытка воздуха от стехиометрического ($\alpha \neq 1$), величина времени воспламенения потока аэрозвеси увеличивается, вследствие чего условия стабилизации пламени ухудшаются.

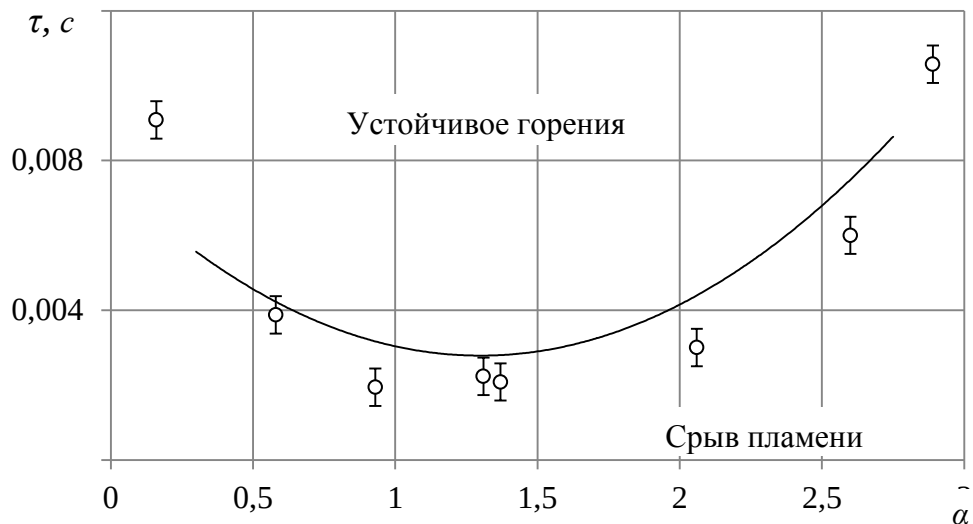


Рисунок 5.2 - Зависимость τ_k от состава смеси

○ - экспериментальные данные [2];

— - расчётные данные по формулам 5.1 и 5.3

Установлено [2], что для порошкообразного алюминия так же, как и для газообразных и жидких топлив, для стабилизаторов в виде плохообтекаемых тел существуют оптимальные, с точки зрения стабилизации, значения затенения сечения. Затенение сечения f_{cm} - отношение площади миделевого сечения стабилизатора к площади канала D_K , что позволяет рассчитать оптимальные параметры плохообтекаемого

тела и подобрать смесь подходящего состава для надёжной стабилизации пламени в высокоскоростном потоке воздуха.

Для канала с внезапным расширением значение затенения сечения является отношение площади характерного размера стабилизатора ($H = D_K - d_0$) к площади выходного отверстия канала D_K (см. рисунок 5.1):

$$f_{cm} = \frac{S_K - S_0}{S_K} = 1 - \frac{d_0^2}{D_K^2}, \quad (5.6)$$

где S_0 - площадь поперечного сечения входного отверстия канала диаметром d_0 ; S_K - площадь поперечного сечения выходного отверстия канала D_K .

Из формул (5.2), (5.4), (5.5) получена зависимость максимальной скорости набегающего потока смеси, при которой происходит срыв пламени от затенения сечения канала $U_{cp}(f_{cm})$.

На рисунке 5.3 представлены расчётные и экспериментальные данные зависимости $U_{cp}(f_{cm})$ для различных видов стабилизаторов.

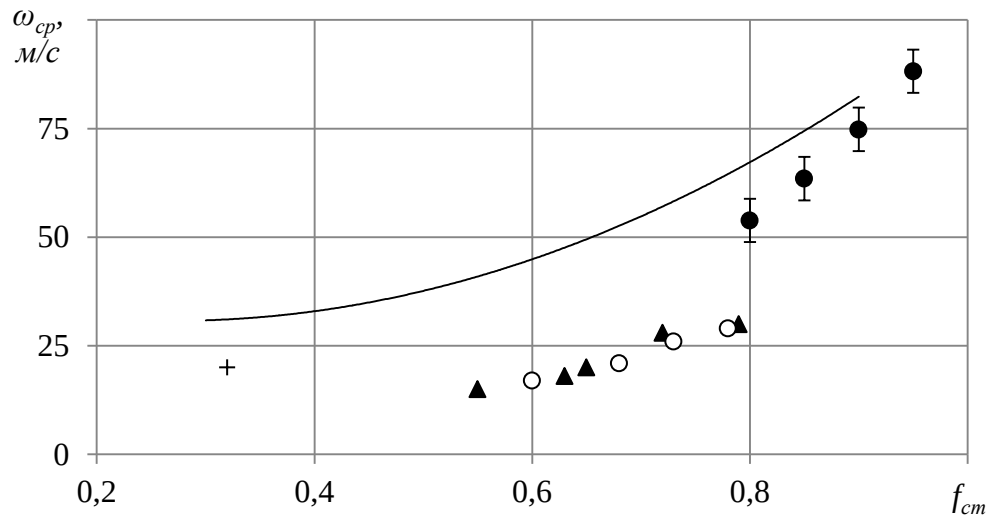


Рисунок 5.3- Влияние f_{cm} на скорость срыва пламени

● – канал с внезапным расширением [2];

▲ – пластина с центральным отверстием
диаметром 33 мм в канале 62×62 мм;

○ – перфорированная пластина: сотовое расположение отверстий [16];

+ – плохобтекаемое тело (конус) [17];

— – расчётная кривая

Из рисунка видно, что увеличением значения f_{cm} в значительной мере увеличивается устойчивость процесса распространения пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия. Также то, что при одном и том же значении $f_{cm} = 0,8$ скорость срыва для канала с внезапным расширением в два раза больше, чем для перфорированных пластин и одним центральным отверстием в пластине.

Скорость срыва U_{cr} в канале с внезапным расширением с характерным размером $H = 0,04$ м [2] в 5 раз больше, чем при стабилизации пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси конусом с диаметром основания 0,04 м [17].

При исследовании механизма стабилизации пламени в турбулентном потоке аэровзвеси частиц алюминия на основе контактной модели, диапазон состава смеси $\alpha < 0,3$ в данном случае не рассматривался. При данных значениях коэффициента избытка воздуха протекает экзотермическая реакция азотирования. Для учета влияния на процесс стабилизации фронта пламени дополнительного тепловыделения и повышения температуры в результате образования нитрида алюминия потребуются проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

5.2 Зажигание основного потока аэровзвеси продуктами сгорания зоны рециркуляции

Горение порошкообразных металлов в турбулентном потоке газообразного окислителя отличается рядом специфических особенностей, обусловленных протеканием химических реакций в условиях динамического и теплового взаимодействия реагентов, интенсивного массопереноса при фазовых превращениях, а также зависимостью параметров процесса, как от термодинамического состояния системы, так и от ее структурных характеристик. Многообразие и сложность указанных факторов затрудняют

разработку полноценной теории стабилизации и рациональных инженерных методов расчета стабилизации пламени в потоке аэровзвеси.

С точки зрения тепловой теории воспламенения непрерывное воспламенение потока аэровзвеси возможно только тогда, когда к единице объема входящей аэровзвеси от источника воспламенения в единицу времени подводится необходимое количество тепла. Это и есть общее условие стационарности пламени в потоке.

Трудность решения задачи заключается в определении количества необходимого тепла. Количество тепла, подводимого из зоны обратных токов к элементу объема аэровзвеси, зависит от гидродинамического и теплового состояния зоны рециркуляции.

Размеры зоны, состав и температура газа в ней, а также среднее время пребывания частиц алюминия и газа (следовательно, и массообмен между зоной обратных токов и основным потоком аэровзвеси) зависят от скорости потока, состава аэровзвеси и характерного размера стабилизатора. В свою очередь, количество тепла, необходимого для воспламенения свежей аэровзвеси, зависит от температуры и начальной интенсивности турбулентности потока, размера частиц d_{32} и т.д.

Л.Н. Хитрину принадлежит наиболее простой и наглядный вывод количественного критерия срыва пламени по модели, основанной на балансе теплообмена рециркуляционной зоны с основным потоком, где условие срыва получено в виде $H \cdot U / \nu = A(H \cdot u / a)^{1/n}$ или $S = A_1(\text{Re}_{кр})^n$, которое в логарифмических координатах хорошо описывает экспериментальные данные прямой линией [101].

Была проверена возможность использования данного подхода для определения условий устойчивого зажигания турбулентного потока аэровзвеси высокотемпературными продуктами сгорания зоны рециркуляции. Результаты обработки экспериментальных данных представлены на рисунке 5.4.

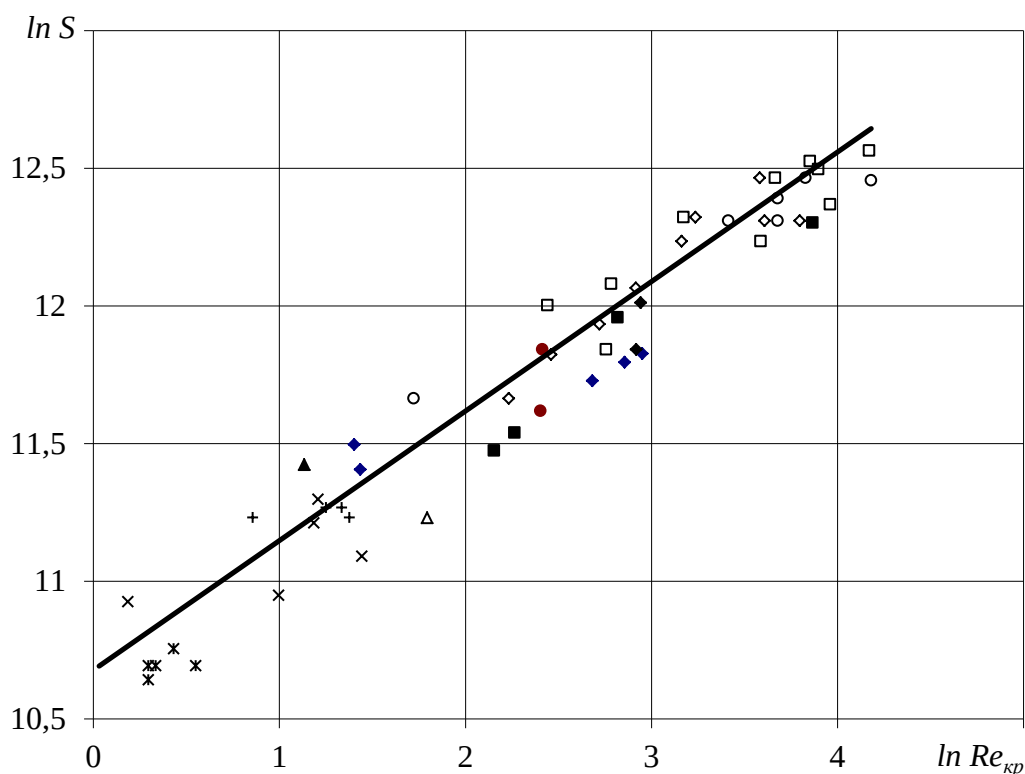


Рисунок 5.4- Характеристики срыва пламени
в логарифмических координатах $\ln S = f(\ln Re_{кр})$

порошок марки АСД-1; $P_0 = 0,1$ МПа;

$D_K = 0,04-0,08$ м; $U_0 = 15...110$ м/с; $\varepsilon_0 = 5...22$ %; $T_0 = 293...523$ К

Как видно из рисунка такой подход вполне возможен для определения условий устойчивого зажигания основного потока аэровзвеси частиц алюминия высокотемпературными продуктами сгорания зоны рециркуляции.

В этом случае для аэровзвеси частиц алюминия значение степени n равно 0,4, а коэффициента A_1 - 1,2.

Начальные параметры потока аэровзвеси при которых проводились испытания представлены в таблицах 5.1- 5.6.

Таблица 5.1-Начальные параметры потока аэровзвеси для камеры сгорания диаметром 0,08 м

Диаметр D_K , м канала	Средний диаметр частиц Al , d_{32} мкм	Начальная температура T_0 , K	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход Воздуха G_B , г/с	Расход порошка G_{Al} , г/с	Коэффициент избытка воздуха α	Скорость воздуха U_0 , м/с	
1	2	3	4	5	6	7	8	
0,08	17,4..7,4	293	5	26	4,8	1,4	20,6	
				33,9	14,3	0,62	25,3	
				30,6	16	0,48	29,9	
				20	5	1,04	20,6	
				25	5,5	1,62	21,9	
				22,6	9,2	0,65	18,6	
				28,3	6,2	1,18	20,6	
				33,9	29	0,3	25,3	
				35,3	14	0,65	25,3	
				41,9	23	0,47	29,9	
		26		4,8	1,4	19,56		
		28,6		20,7	0,35	24,6		
		26,6		15,2	0,45	26,6		
		35,3		15,3	0,7	35,3		
		41,9		14,68	0,74	36,6		
		43,3		13,5	0,8	36,6		
		42		9,1	1,3	35,3		
		31,3		3,98	2	26,6		
		33,3		2,9	2,89	28,6		
		17,9		7,15	0,67	15,3		
		29,9		20	0,38	25,3		
		36,6		17,6	0,54	30,66		
		57,8		17,4	0,65	27		
		44,6		13,9	0,83	37,7		
		41,3		13,6	0,78	34,6		
		30,6		11,25	0,72	26,6		
		31,2		5	1,63	26		
		293		12	25	11,2	0,59	18
					33	9	0,96	25
					40	24,4	0,42	22
			38		27	0,37	29	
			46,7		29,3	0,16	33,3	

Таблица 5.2-Начальные параметры потока аэрозвеси для камеры сгорания диаметром 0,07 м

Диаметр канала D_K , м	Средний диаметр частиц Al, d_{32} , мкм	Начальная температура T_0 , K	Начальная турбулентность ϵ_0 , %	Расход Воздуха G_B , г/с	Расход порошка G_{Al} , г/с	Коэффициент избытка воздуха α	Скорость воздуха U_0 , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
0,07	17,4..7,4	293	5	17	6,2	0,72	49
				27,5	63,5	0,157	78
				29	31	0,26	84
				34	50,67	0,17	97
				36	61,1	0,15	103
				37,5	84	0,12	107
				18	20,44	0,23	52
				27	56,3	0,12	77
				35	36,27	0,25	99
				23	21	0,28	66
				31,5	68,16	0,12	88
				35	64	0,14	100
				27	46,9	0,15	77
				21	14,9	0,37	61
				52	0,93	0,49	52
				15	9,54	0,4	44
			12	18	16,58	0,28	51
				20	21,5	0,24	57
				22,5	26,14	0,22	65
				27	33,43	0,21	77
				27	67,43	0,1	77
				29	63,1	0,12	83
				34	50,85	0,17	97
				15	15,38	0,25	43,5
				15	13,2	0,295	43,5
				29,5	36	0,21	84
			22	29	52,2	0,14	83
				15	5,3	0,74	43,5
				34	43,6	0,2	97
				34	62	0,14	96
				25	54	0,105	67
				29	28,8	0,26	83
				29	37,5	0,2	83
				30	37,5	0,2	90

Таблица 5.3-Начальные параметры потока аэровзвеси для камеры сгорания диаметром 0,06 м

Диаметр канала D_k, d_{32} м	Средний диаметр частиц $Al, \text{мкм}$	Начальная температура T_0, K	Начальная турбулентность $\varepsilon_0, \%$	Расход Воздуха $G_B, \text{г/с}$	Расход порошка $G_{Al}, \text{г/с}$	Коэффициент избытка воздуха α	Скорость воздуха $U_0, \text{м/с}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0,06	17,4..7,4	293	5	20,5	26,3	0,325	58
				20,5	34,85	0,448	58
				21	13,5	0,59	48
				17	18	0,24	47
				24,5	44,8	0,13	70
				36	88	0,108	103
				36	67	0,14	103
				25	23,5	0,27	73
				15	12,1	0,32	45
			12	14	6,2	0,59	42
				18	25,66	0,15	45
				17	21,3	0,16	50
				19	33,86	0,15	55
				18,5	25,66	0,19	62
				22	28,25	0,229	64
				20	21,57	0,24	58
				15,5	6	0,67	46
				15,5	3	1,37	46
				19,5	45,6	0,1	43,5
				25	61,4	0,11	48
				20	22,3	0,24	59
				24	40,6	0,15	70
				16,5	3,56	1,24	49
				15	1,66	2,6	43,5
				19,5	36,4	0,14	19,5
				21	14	0,139	21
				13,5	26,9	0,13	41,5
				16,5	16,4	0,26	48
				27	28	0,26	77
				22,5	27,3	0,2	65
			22	22,5	11,6	0,51	65
				17,5	11,5	0,39	52
				15	14	0,325	45

Таблица 5.4-Начальные параметры потока аэровзвеси для камеры сгорания диаметром 0,05 м и 0,04 м

Диаметр D_K , d_{32} м	Средний диаметр частиц Al , мкм	Начальная температура T_0 , К	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход Воздуха G_B , г/с	Расход порошка G_{Al} , г/с	Коэффициент избытка воздуха α	Скорость воздуха U_0 , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
0,05	17,4..7,4	293	5	14	16,4	0,22	41
				17	28	0,16	50
				15	16,75	0,23	43,5
				14	9,6	0,38	42
				16,5	29,7	0,14	49
				18	42	0,11	55
				20	34,16	0,15	58
				19,5	25,1	0,2	56
				19,5	21	0,24	56
				18	18,2	0,25	55
				16	9,5	0,44	47
				14	12	0,3	41
				16	24	0,17	48
				16	23,2	0,18	47
				13	1,22	2,89	38
			22	19,5	29,4	0,17	57
				22	23,7	0,26	64
				18	22,37	0,2	54
				19,5	11,5	0,43	57
				16	8,4	0,5	48
				15	4	1	45
				19,5	19,5	0,14	57
				17,5	45,8	0,1	51
				21	46,6	0,118	61
0,04	17,4..7,4	293	5	15	31	0,11	42
				19,5	49,5	0,1	56
				25	44,2	0,14	65
				17,5	21	0,21	54
				14	19,3	0,2	40
				14	15,1	0,26	40

5.3 Определение границ стабилизации пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия

Устойчивость горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия зависит от многих переменных - размеров и геометрической формы стабилизатора, температуры, скорости, давления и интенсивности турбулентности потока, состава аэровзвеси, химической природы частиц, условий горения - в свободном потоке или в трубе и других. В связи с этим необходимо получить экспериментальные данные о влиянии различных факторов на границы устойчивого горения в турбулентном потоке аэровзвеси частиц алюминия, которые позволят определить качественные закономерности и получить некоторые количественные соотношения [2].

В [1] стабилизация фронта пламени в форкамере реализовывалась, посредством поперечного вдува встречных струй воздуха. По результатам испытаний в координатах $\alpha_1 - V_{0,1}$ были построены области стабилизации пламени в первичном потоке аэровзвеси порошков АСД-1 и АСД-4 (см. рисунок 1.19). Как видно из рисунка границы стабилизации определены в узких пределах, как по скорости набегающего потока ($V_{0,1} = 1 \div 40 \text{ м/с}$), так и по составу аэровзвеси ($\alpha = 0,04 \div 0,3$). Максимальная скорость срыва соответствует значению $\alpha = 0,08 \div 0,12$.

В [17] представлен вариант организации рабочего процесса в прямоточной камере сгорания со стабилизацией фронта пламени посредством плохобтекаемого тела. Результаты экспериментальных исследований по определению границ устойчивого горения представлены на рисунке 1.22. Здесь отмечены также низкие скорости набегающего потока аэровзвеси на стабилизатор, диапазон по составу смеси был несколько шире ($\alpha = 0,2 \div 1,0$). Скорость срыва обратно пропорционально составу смеси (экспериментальные данные аппроксимированы прямой линией). Максимальная скорость срыва соответствует значению коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 0,2$.

В [59] исследован процесс стабилизации пламени в высокоскоростном турбулентном потоке алюминиево-воздушной смеси с помощью зоны рециркуляции, возникающей при внезапном расширении осесимметричного канала. На рисунке 1.24 представлена зависимость $U_{cp}(\alpha)$, на котором видно, что в области $\alpha \approx 0,2$ имеется ярко выраженный максимум и зависимость $U_{cp}(\alpha)$ не является линейной. Границы срыва пламени определены по скорости набегающего потока в диапазоне $V_{cp} = 100 \div 300 \text{ м/с}$ и в диапазоне изменения состава смеси $\alpha = 0,1 \div 1,5$. Максимальная скорость срыва на этом графике также как на рисунках 1.19 и 1.22 соответствует значению $\alpha \approx 0,2$.

С одной стороны, в [1, 17, 59] максимальная скорость срыва соответствующая значению $\alpha \approx 0,2$ согласуется с данными [16, 40, 41, 43] по скорости распространения пламени в переобогащенных аэровзвесьях частиц алюминия. С другой стороны в [21, 40, 41, 43] установлено, что при низких значениях коэффициента избытка воздуха α , скорость распространения пламени U_f в аэровзвесьях частиц алюминия увеличивается, а при составах смеси близком к стехиометрическому U_f - уменьшается (см. рисунки 1.6 и 1.7). Что противоречит данным термодинамических расчетов по определению влияния коэффициента избытка воздуха на тепловыделение и термодинамическую температуру [1]. Результаты расчетов, представленные на рисунке 1.5, предполагают увеличение скорости распространения пламени при составах аэровзвеси частиц алюминия близких стехиометрическим $\alpha \approx 1,0$.

Таким образом, имеющаяся противоречивая информация по устойчивости горения [1, 17, 59] не дает полного представления о пределах стабилизации пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия и необходимо проведение дальнейших исследований по определению границ устойчивого горения в стехиометрических и «бедных» составах.

Поскольку в работах [18, 60, 3, 17, 57-60] наиболее полно исследована «богатая» область срыва фронта пламени ($\alpha = 0,01 \div 0,6$), и полученные данные соответствуют теоретическим представлениям [1]. Поэтому в настоящей работе было принято решение наиболее полно определить границы срыва пламени в потоке аэровзвеси, содержащей частицы алюминия АСД-4 стехиометрического ($\alpha \approx 1,0$) и «бедного» составов ($\alpha = 1,0 \div 3,0$).

На рисунке 5.5 показаны границы срыва для аэровзвеси частиц с АСД-4, полученные в диапазоне изменения состава смеси $\alpha = 0,5 \div 2,0$.

Из рисунка видно, что для аэровзвеси, содержащей частицы алюминия АСД-4 с $d_{32} = 7,4$ мкм максимальная скорость потока, при которой происходит срыв пламени, U_{cp} соответствует значению коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 1$. С отклонением значений коэффициента избытка воздуха в сторону «бедных» или богатых «смесей» скорость потока, при которой, наблюдается срыв пламени - уменьшается.

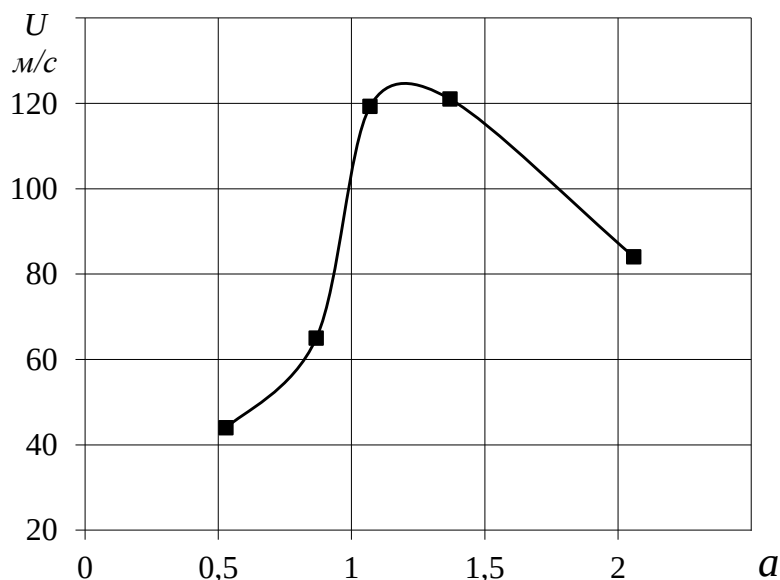


Рисунок 5.5- Границы устойчивого горения в потоке аэровзвеси с АСД-4

$$D_K = 0,07\text{м}; T_0 = 293\text{К}; P_0 = 0,1 \text{ МПа}$$

Было определено влияние начальной турбулентности потока аэровзвеси на границы срыва, которая варьировалась посредством установки

решетки во входном канале. Начальные параметры потока аэровзвеси, при которых проводились испытания, представлены в таблицах 5.5 и 5.6.

Таблица 5.5- Начальные параметры потока аэровзвеси без установки решетки во входном канале

Марка порошка алюминия	Средний диаметр частиц Al, d_{32} мкм	Диаметр камеры, м	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход Воздуха G_B , г/с	Скорость воздуха U_{cp} , м/с	Расход порошка Al G_{Al} , г/с	Коэффициент избытка воздуха α
1	2	3	4	5	6	7	8
АСД-4	$d_{32} = 7,4$	0,07	5	14,5	43	2,56	1,45
				15	44	7,38	0,53
				14	42	2,3	1,67
				22,5	65	6,9	0,86
				25	84	3,9	2,06
				30	73	3,7	1,62
				43	121	8,3	1,37
				40	113	7,9	1,31

Таблица 5.6- Начальные параметры потока аэровзвеси с установкой решетки во входном канале на $l_p = 0,02$ м

Марка порошка алюминия	Средний диаметр частиц Al, d_{32} мкм	Диаметр камеры, $D_{кс}$, м	Начальная турбулентность ε_0 , %	Расход Воздуха G_B , г/с	Скорость воздуха U_{cp} , м/с	Расход порошка Al G_{Al} , г/с	Коэффициент избытка воздуха α
1	2	3	4	5	6	7	8
АСД-4	17,5	0,07	22	15	42,5	12,5	0,32
				22,5	65	10	0,58
				30,5	87	4	1,53
				34	97	6	1,42
				22	65	5	1,3
				25	73	5,06	1,28
				46	130	13	0,93
				40	113	9	1,15
				20	57	1	5,2
				20	57	3,05	1,7
				16	47	1,7	1,86

Характеристики срыва пламени в потоке аэровзвеси, содержащей частицы АСД-4, в гладком канале и в канале с решеткой, установленной на расстоянии $l_p = 0,02$ м. представлены на рисунке 5.6.

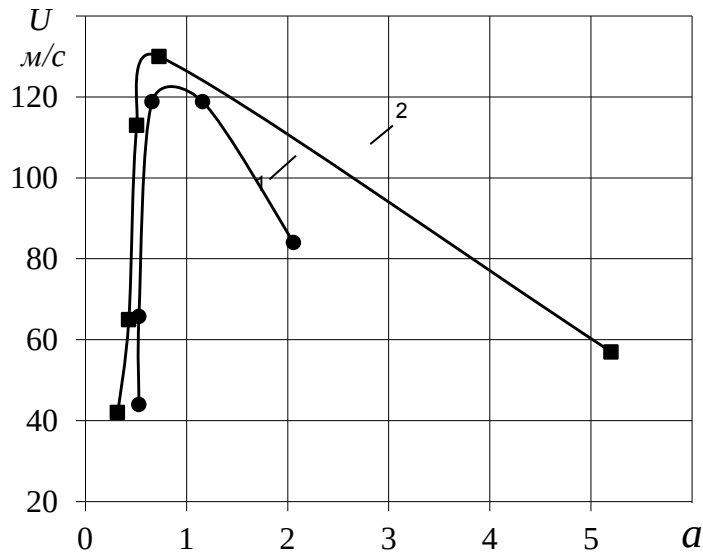


Рисунок 5.6 - Влияние решетки на границы срыва аэровзвесь с АСД-4; $D_K = 0,07$ м; $T_0 = 293$ К; $P_0 = 0,1$ МПа
1 - без решетки; 2 - с решеткой на $l_p = 0,02$ м

Из рисунка видно, что в случае установки решетки, границы устойчивого горения в потоке алюминиево-воздушной смеси содержащей частицы АСД-4, расширяются как по скорости потока, так и по составу смеси, поскольку с уменьшением ε_0 увеличиваются длина зоны рециркуляции, время пребывания реагентов и температура в ней [60, 99, 102].

Данный факт объясняется тем, что турбулизирующая решетка в камере диаметром 0,07 м действует как гасящая сетка по отношению к крупномасштабной турбулентности набегающего потока.

Установлено, что границы срыва пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия с АСД-4 по аналогии с однородными горючими смесями [101] можно аппроксимировать выражением U/H^n (рисунок 5.7). Результаты обработки экспериментальных данных показали, что для аэровзвеси,

содержащей порошок марки АСД-4, в выражении U/H^n показатель степени соответствует значению $n = 0,05$.

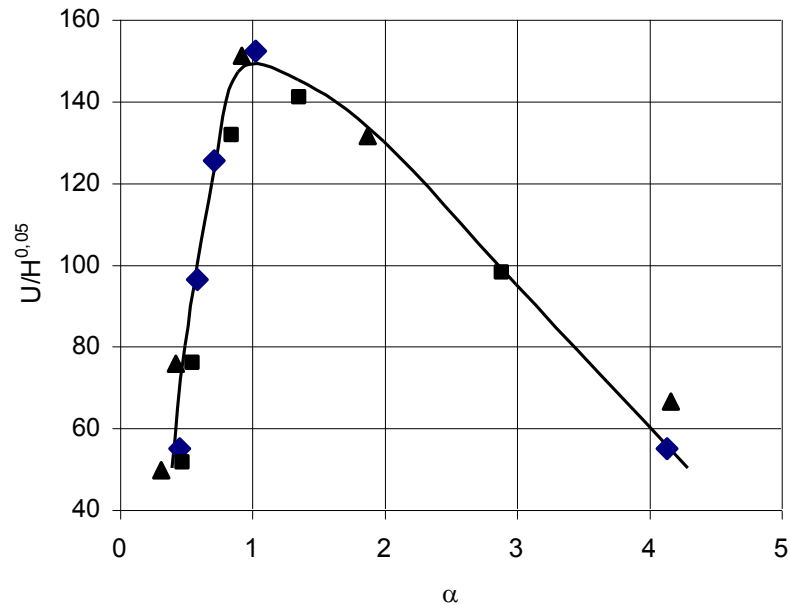


Рисунок 5.7 - Пределы срыва пламени
порошок АСД-4; $T_0 = 293$ К; $P_0 = 0,1$ МПа;
 ◆ - $D_K = 0,04$ м; $H = 0,02$ м; $\varepsilon_0 = 5\%$;
 ■, ▲ - $D_K = 0,05$ м; $H = 0,03$ м; $\varepsilon_0 = 5\%$;

При значении показателя степени $n = 0,05$ выражение U/H^n хорошо описывает экспериментальные данные. Форма кривой линии, около которой располагаются экспериментальные точки, соответствует аналогичной кривой для однородных горючих смесей, стабилизированных с помощью стержней [101].

Результаты наших исследований и данные, полученные ранее другими авторами по определению границ устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия, представлены на рисунке 5.8 в виде зависимости $U_0 = f(\alpha)$.

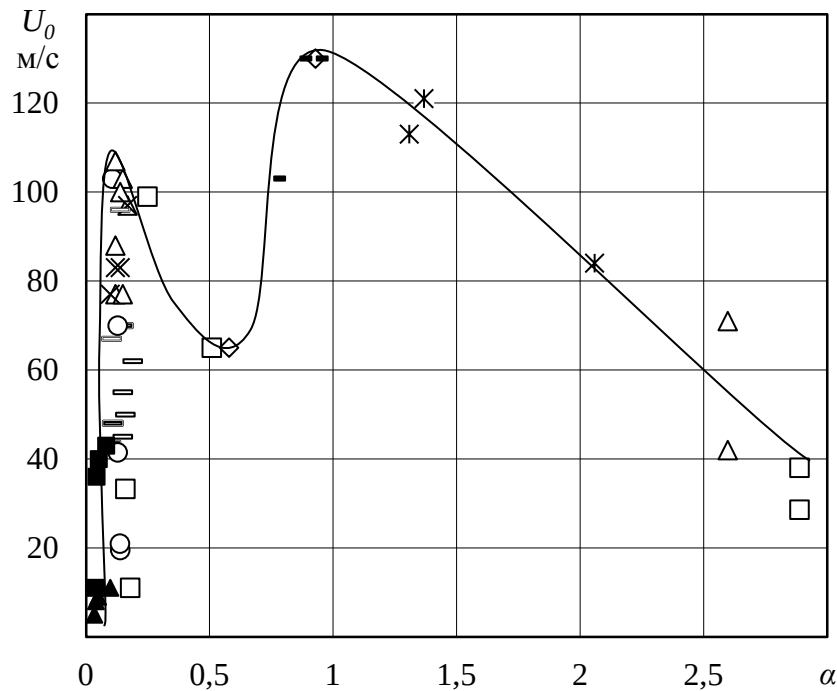


Рисунок 5.8 - Границы устойчивого горения
в потоке аэровзвеси частиц алюминия

$$D_K = 40 \div 80 \text{ мм}; \varepsilon_0 = 5 \div 22\%; T_0 = 293 \div 523 \text{ К}; d_{32} = 7,4 \div 17,4 \text{ мкм}$$

Δ , $\square$, $*$ - данные настоящей работы; $\blacktriangle$, $\blacksquare$ – данные [1];

$\circ$, $-$, $\square$, $\diamond$, $\times$ – данные [60]

Из рисунка видно, что в отличие данных полученных в [1-3], кривая зависимости $U_0 = f(\alpha)$ имеет два максимума один в области «богатых» смесей, второй максимум - в стехиометрических. Здесь также как и в [1, 17, 59], при $\alpha = 0,04 \div 0,12$ наблюдается резкий рост скорости срыва пламени в потоке аэровзвеси, который достигает максимальных величин при значениях $\alpha \approx 0,12$. Резкое увеличение скорости срыва при низких значениях α , за счет дополнительного тепловыделения и роста температуры обусловлен реакцией азотирования [1].

Далее, с увеличением коэффициента избытка воздуха α , растёт содержание кислорода в зоне реакции. Молекулы кислорода замещают молекулы азота, однако в виду низкого содержания кислорода в зоне реакции в диапазоне $\alpha = 0,2 \div 0,6$ наблюдается резкое уменьшение скорости срыва пламени. Затем, при насыщении зоны реакции кислородом, его количества

достаточно для полного сгорания частиц алюминия, вследствие чего наблюдается рост скорости срыва пламени.

Второй максимум скорости срыва на кривой зависимости $U_0 = f(\alpha)$ соответствует значению $\alpha = 0,9 \div 1,1$. При дальнейшем увеличении значения коэффициента избытка воздуха и соответственно содержания кислорода скорость срыва равномерно уменьшается.

Определенные экспериментально в настоящей работе границы устойчивого горения в турбулентном потоке аэровзвеси частиц алюминия и построенная по ним зависимость $U_0 = f(\alpha)$ согласуются с результатами проведенных ранее расчетов [1]. Из рисунка 5.8 видно, что максимальные значения скорости срыва пламени при $\alpha = 0,1 \div 0,3$ и $\alpha = 0,9 \div 1,1$ соответствуют максимальным значениям тепловыделения и термодинамической температуры продуктов сгорания при тех же значениях коэффициента избытка воздуха α (см. рисунок 1.5).

Принимая во внимание то обстоятельство, что скорость набегающего на стабилизатор потока аэровзвеси U_0 в момент срыва фронта пламени равна скорости распространения пламени U_f [17]. Зависимость скорости распространения пламени в аэровзвеси частиц алюминия от коэффициента избытка воздуха $U_f = f(\alpha)$ будет подобна зависимости $U_0 = f(\alpha)$ и максимальные значения U_f будут соответствовать значениям $\alpha = 0,1 \div 0,3$ и $\alpha = 0,9 \div 1,1$.

В первом разделе было отмечено, что на рисунках 1.6 и 1.7 уменьшение скорости распространения пламени U_f в аэровзвесьях частиц алюминия с увеличением α от 0,5 до 1,0, не согласуется с ростом значений температуры и тепловыделения, которые принимают свои максимальные значения при $\alpha \approx 1,0$, полученные термодинамическими расчетами и представленные на рисунке 1.5.

На рисунке 5.9 показаны результаты термодинамических расчетов зависимости тепловыделения, температуры продуктов сгорания от коэффициента избытка воздуха [1] и зависимость скорости распространения

пламени U_f от коэффициента избытка воздуха, полученная в настоящей работе.

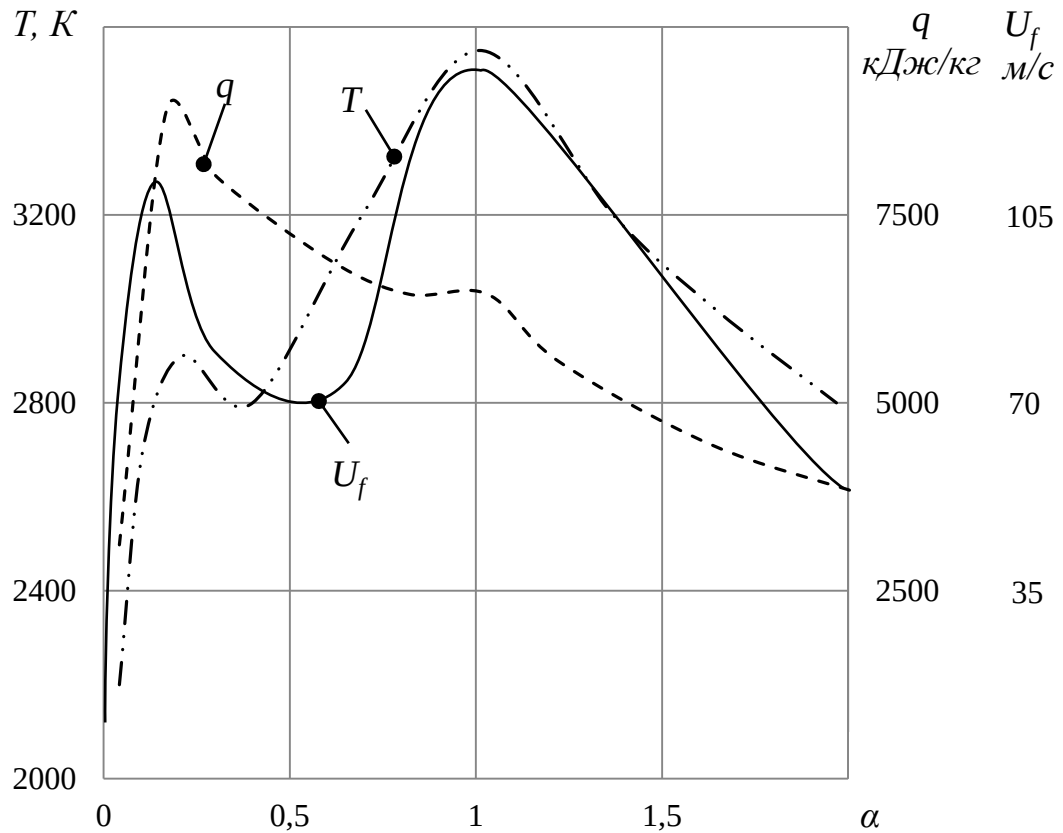


Рисунок 5.9 – Зависимость тепловыделения q , температуры T и скорости распространения пламени U_f от коэффициента избытка воздуха α

Значения и характер зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха соответствуют величине скорости срыва пламени полученной нами посредством определения границ устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия.

Из рисунка видно, что максимальные значения тепловыделения q , температуры T и скорости распространения пламени U_f от коэффициента избытка воздуха наблюдаются при одних и тех же значениях α .

Таким образом, установлено, что на кривой зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха $U_f = f(\alpha)$, при $\alpha \approx 1,0$ должен быть второй максимум, который отсутствует на рисунках 1.6 и

1.7 [41, 43].

Авторами [43] отмечено, что скорость распространения пламени в аэровзвеси частиц алюминия с ростом α экспоненциально уменьшается (см. рисунок 1.7) и что превалирующее воздействие на скорость срыва пламени оказывает не состав аэровзвеси, а гидродинамические параметры.

Однако полученные нами экспериментальные данные свидетельствуют о том, что на скорость срыва пламени U_0 , соответственно и на скорость распространения пламени U_f в большей степени оказывает влияние состав смеси, а не гидродинамические параметры потока. Изменение гидродинамических параметров потока смеси (скорость воздушного потока от 10 до 130 м/с; степень турбулентности то 5 до 22%; диаметр канала с внезапным расширением от 40 до 80 мм; диаметр исходных частиц алюминия d_{32} от 7,4 до 17,4 мкм) не привели к качественному изменению зависимости скорости срыва пламени от состава смеси.

Результаты наших исследований по определению границ устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха ($\alpha \approx 0,01 \div 3,0$) выявили характер зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха $U_f = f(\alpha)$, который соответствует характеру зависимости тепловыделения и температуры продуктов сгорания полученными термодинамическими расчетами [1]. Таким образом, полученные новые данные подтверждают закономерность зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха $U_f = f(\alpha)$ теоретическим представлениям.

5.4 Выводы

1. На основе теории контактной модели исследован процесс стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в камере с внезапным расширением. Получена формула для расчета времени

контакта частиц алюминия с зоной рециркуляции.

$$\tau_k = \frac{d_q}{\omega \cdot K} \cdot \left(1 - \frac{d_0}{D_K}\right)$$

Расчетные значения времени контакта τ_k , вычисленные по данной формуле согласуются со значениями τ_k , полученные другими авторами экспериментальным путем.

2. Предложен критерий срыва пламени по модели, основанной на балансе теплообмена рециркуляционной зоны с основным потоком аэровзвеси в виде $S = A_1 (\text{Re}_{kr})^n$, $n = 0,4$ и $A_1 = 1,2$ и которое в логарифмических координатах хорошо описывает экспериментальные данные прямой линией.

3. Установлены границы срыва пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия с АСД-4, полученные в диапазоне изменения состава смеси $\alpha = 0,5 \div 2,0$. Максимальная скорость потока, при которой происходит срыв пламени U_{cp} , соответствует значению коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 1$.

4. Определены границы устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения состава $\alpha = 0,01 \div 3,0$. Установлено, что кривая зависимости $U_0 = f(\alpha)$ имеет два максимума один в области «богатых» смесей, второй - в области стехиометрических составов.

5. Результаты исследований по определению границ устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 0,01 \div 3,0$) дают все основания утверждать о наличии второго максимума на кривой зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха $U_f = f(\alpha)$.

6 УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

6.1 Оптимизация внутрикамерных процессов

Одним из направлений оптимизации внутрикамерных процессов в двигательных и технологических установках является правильное задание начальных параметров потока аэровзвеси частиц алюминия поступающего в форкамеру - размер частиц алюминия, скорость и температура несущего воздушного потока, состав аэровзвеси и др.

В качестве исходного порошка в технологических и двигательных установках в качестве металлического горючего следует применять порошок АСД-4. Полнота сгорания данного порошка почти вдвое выше, чем полнота сгорания порошка АСД-1. Это связано с тем, что средний размер частиц порошка АСД-1 составляет 17,4 мкм, тогда как для частиц порошка АСД-4 он равен 7,4 мкм [50]; тепловые и диффузионные потоки в системе обратно пропорциональны размеру сгорающей частицы, а время сгорания пропорционально размеру сгорающей частицы в степени $1,5 \div 2$ [22, 51].

Любое увеличение скорости набегающего на стабилизатор потока неизбежно оказывает отрицательное воздействие на воспламенение и устойчивость горения [64].

Результаты наших исследований [103, 104] и других авторов [60] по определению влияния начальной скорости потока U_0 на пределы воспламенения и устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия показали, что увеличение скорости основного потока ведет к обогащению состава смеси и сужает диапазон состава смеси, внутри которого возможно устойчивое горение.

Для оптимизации внутрикамерных процессов в двигательных и технологических установках требуются эффективные методы и средства управления процессами тепло- и массообмена, горения и стабилизации пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

С точки зрения организации процесса горения одно из наиболее существенных и полезных явлений в закрученных струйных течениях - образование приосевой рециркуляционной зоны, которая существенно укорачивает длину факела и расстояние от горелки, на котором происходит стабилизация пламени. Форма и размер рециркуляционной зоны и соответствующей области с повышенным уровнем турбулентности оказывает решающее влияние на устойчивость факела, интенсивность процесса горения и другие характеристики пламени [71].

Скорость горения дисперсного алюминия и соответственно полнота его выгорания во многом зависят от условий воспламенения частиц и теплового уровня в начальной зоне камеры сгорания. Потому посредством закрутки воздушного потока и организацией центральной тороидальной рециркуляционной зоны (ЦТРЗ) можно будет повысить тепловой уровень в начальной зоне основной камеры и сместить зону горения к оси. Это позволит повысить температуру в начальной зоне камеры и поддерживать высокотемпературный паро- или газофазный режим, а также увеличить срок службы оборудования.

В результате проведённого компьютерного моделирования были определены оптимальные значения параметра закрутки $S \approx 1,8$ и начальной скорости аэрозвеси части алюминия $U_0 = 10 \div 17,5$ м/с, для организации тороидальной рециркуляционной зоны оптимальных параметров. При значении параметра закрутки воздуха $S = 1,8$ время пребывания частиц в камере сгорания максимально и с увеличением S , время пребывания частиц алюминия практически не изменяется.

С увеличением температуры несущего воздушного потока скорость срыва пламени и диапазон устойчивого горения в аэрозвеси частиц алюминия увеличиваются. Так, например, увеличение T_0 от 293 до 573 К диапазон устойчивого горения смещается в область «бедных» смесей и увеличивается скорости срыва пламени, что объясняется увеличением скорости

турбулентного горения, вызванного ростом нормальной скорости горения аэровзвеси частиц алюминия u_n с 0,08 до 0,3 м/с. [105].

Состав потока аэровзвеси на входе в форкамеру должен быть стехиометрического состава ($\alpha \approx 1,0$). В этом случае процесс горения в форкамере двигательной установки будет протекать в парофазном режиме, при максимальной температуре и следовательно с высокой полнотой сгорания. Выполнение этого условия в установках газодисперсного синтеза гарантирует получение высокодисперсного химически чистого, конечного продукта. Реакция азотирования в этом случае будет исключена.

Известно [63], что наиболее удобным и достаточно удовлетворительным источником зажигания является электрический разряд, эффективно преобразующий электрическую энергию в тепло, которое концентрируется в относительно малом объеме. Системы высокой энергии наиболее эффективны, когда используются в комбинации со свечами поверхностного разряда. Поэтому для зажигания высокоскоростного турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия в форкамере использовалась система зажигания со свечой поверхностного разряда СПН-4-3Т. Для инициирования процесса зажигания свеча поверхностного разряда СПН-4-3Т оказалась наиболее эффективной из 3-х свечей представленных на рисунке 2.2. Выделяемая ею энергия электрического разряда $W = 0,05$ Дж достаточна для надежного зажигания частиц алюминия АСД-4 и АСД-1. Поскольку расчётное значение минимальной энергии зажигания необходимое для воспламенения потока аэровзвеси частиц алюминия по формуле 4.4 составляет 0,025 Дж.

Считается общепризнанным, что положение свечи имеет определяющее влияние, как на характеристики воспламенения, так и на срок ее службы. Результаты исследований, представленные в 3-ей главе, позволили выбрать оптимальное место установки свечи зажигания ($L_{св} = (0,5 \dots 1,2) \cdot H$). Это обусловлено тем, что в донной области зоны рециркуляции, время пребывания частиц алюминия на порядок было больше

чем в зоне обратных токов, что будет способствовать надежному их воспламенению.

Место расположения свечи в указанных пределах также отвечало требованиям повторного запуска камеры в случае срыва пламени, так как электроды свечи оставались чистыми, поскольку эта часть внутренней поверхности стенки камеры не покрывалась продуктами сгорания вследствие существующей спонтанной закрутки потока в донной области зоны рециркуляции.

Анализ и обработка полученных скоростной киносъемкой экспериментальных данных показали, что для обеспечения надежного процесса зажигания основного потока аэровзвеси необходимо создать условия для возникновения начального очага около свечи, переброса пламени из донной области в зону обратных токов и распространения пламени по всей зоне рециркуляции.

Условие переброса пламени в зоне рециркуляции для аэровзвеси частиц алюминия, так же как и в бензовоздушной смеси [106], может быть описано выражением
$$\frac{U_{св}}{U_n} \leq \frac{L_{зр}(1 - \bar{L}_{св})}{R_{кс}} (1 - \sqrt{B_z}),$$
 где $U_{св}$ - скорость потока у свечи; U_n - нормальная скорость горения; $L_{зр}$ - размеры зоны рециркуляции; $R_{кс}$, $B_z = H^2/D_{к}^2$ - геометрические параметры модели; $\bar{L}_{св}$ - координата свечи зажигания.

В процессе определения границ надежного воспламенения были установлены минимальные значения характерного размера канала ($H = 0,007$ м), и расхода порошка алюминия ($G_{Al} = 3$ г/с), при меньших величинах которых, зажигания основного потока аэровзвеси частиц алюминия в форкамере не происходило.

В качестве стабилизатора пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия необходимо использовать внезапное расширение канала, поскольку оно позволяет стабилизировать фронт пламени в более широких диапазонах, как по скорости потока, так и по составу алюминиево-воздушной

смеси по сравнению с плохообтекаемым телом и перфорированными пластинами.

6.2 Метод управления характеристиками горения аэрозвеси частиц алюминия в форкамере

Исследования показали [107], что метод наложения пульсаций продольной составляющей скорости (псевдотурбулентных пульсаций) является наиболее эффективным для интенсификации процессов массо- и теплообмена. Он позволяет не только ускорять процесс развития струи, но и существенно замедлять его за счет уменьшения поперечной диффузии, что делает его более универсальным по сравнению с другими методами нестационарных воздействий и особенно перспективным для достижения практических целей.

Влияние нестационарных воздействий на процесс горения порошкообразного алюминия в камере с внезапным расширением представлено в [108]. В настоящей работе для управления процессом горения аэрозвеси частиц алюминия в форкамере, предложен метод псевдотурбулентных пульсаций, накладываемые на дискретные струи воздуха, вдуваемые в слой смешения за плоскостью внезапного расширения. Испытания проводились на установке, представленной на рисунке 2.7.

Модель форкамеры (рисунок 6.1) представляла собой осесимметричный канал диаметром $D_K = 0,08$ м с диаметром входного отверстия $d_0 = 0,04$ м и длиной $L_{KC} = 0,25$ м.

Пульсирующая струя из ротора по магистрали через штуцер 1 поступала в кольцевой коллектор 2, расположенный на задней торцевой стенке камеры. Затем через 12 отверстий 4 диаметром 0,0025 м, равномерно расположенных вокруг входного отверстия 5, пульсирующие струи воздуха вдувались в форкамеру 3.

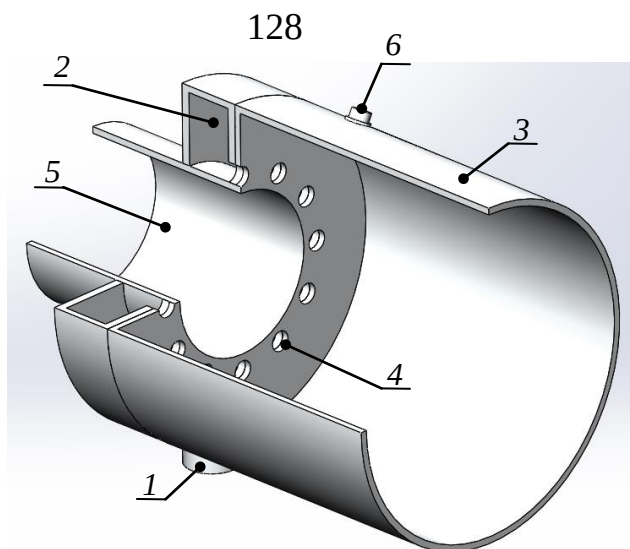


Рисунок 6.1 – Модель форкамеры с вдувом дискретных пульсирующих струй воздуха

Поток аэровзвеси частиц алюминия поступал в форкамеру через входное отверстие 5. Зажигание высокоскоростного турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия осуществлялось с помощью электрической свечи 6.

Дискретные пульсирующие струи воздуха вдувались с параметром спутности $m = 0 \dots 6$, который определялся отношением U_{cmp} / U_0 , где U_{cmp} - скорость пульсирующих струй воздуха; U_0 - скорость основного потока воздуха, поступающего в камеру через входное отверстие d_0 . Число Струхала Sh возмущающего воздействия изменялось в диапазоне $0,001 \dots 0,004$ при уровнях воздействия $0,8 \dots 3,1$ % от входной скорости струи. Число Sh определялось как отношение $f \cdot d_{отв} / U_{cmp}$, где f - частота в Гц; $d_{отв}$ - диаметр отверстий для пульсирующих струй воздуха.

Методом «масляной пленки» были получены картины течения в форкамере при вдуве дискретных струй воздуха в слой смешения за плоскостью внезапного расширения. Увеличивая скорость подачи пульсирующих струй воздуха, или меняя их частоту, можно было следить за динамикой развития картины течения в форкамере (трансформированием зоны рециркуляции за плоскостью внезапного расширения и возникновением приосевого рециркуляционного течения, изменением вихревой структуры потока и т.д.).

На рисунке 6.2 показана квазистационарная картина течения в форкамере с вдувом пульсирующих струй воздуха с частотой $f = 150$ Гц.

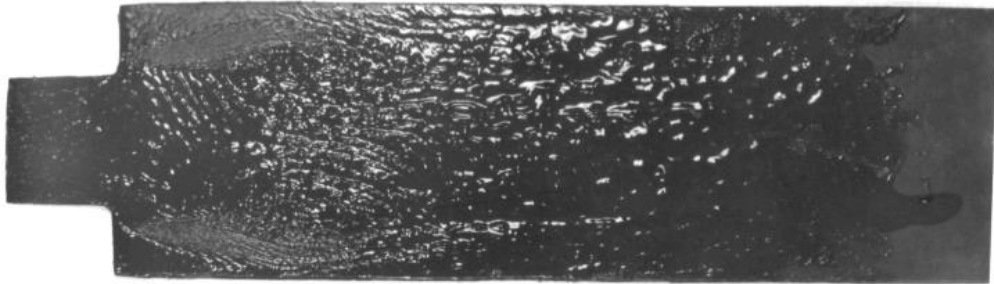


Рисунок 6.2 - Картина течений в форкамере
с вдувом дискретных струй воздуха с $f = 150$ Гц

Как видно из рисунка, вместо зоны обратных токов за внезапным расширением появляется центральная тороидальная рециркуляционная зона (ЦТРЗ) [71].

Полученные данные по визуализации течения в форкамере показали, что с изменением частоты пульсирующих струй от 0 до 150 Гц длина ЦТРЗ увеличивается с 60 до 95 мм, дальнейшее увеличение частоты до 400 Гц приводит к уменьшению ее длины до 65 мм. Также было выявлено, что увеличение частоты, с 200 до 700 Гц, приводит к уменьшению масштаба вихревой структуры потока.

Известно [109], что интенсификация горения обогащенных горючих струй в камере сгорания и стабилизация фронта пламени могут быть обеспечены за счет управления мелкомасштабным турбулентным смешением в пограничном слое струи. Следовательно, варьируя частотой вдуваемых струй воздуха, можно управлять процессом смешения в пограничном слое основного потока аэрозвеси.

В испытаниях с горением исследовалось влияние дискретных струй воздуха, вдуваемых в слой смешения за внезапным расширением, и частоты псевдотурбулентных пульсаций, накладываемых на них, на температуру продуктов сгорания.

В случае вдува пульсирующих струй воздуха в слой смешения за внезапным расширением процесс горения интенсифицируется, и температура в камере повышается. Максимальные значения температуры были зафиксированы на оси форкамеры, что является положительным эффектом с точки зрения уменьшения температурной нагрузки на стенки камеры (рисунок 6.3).

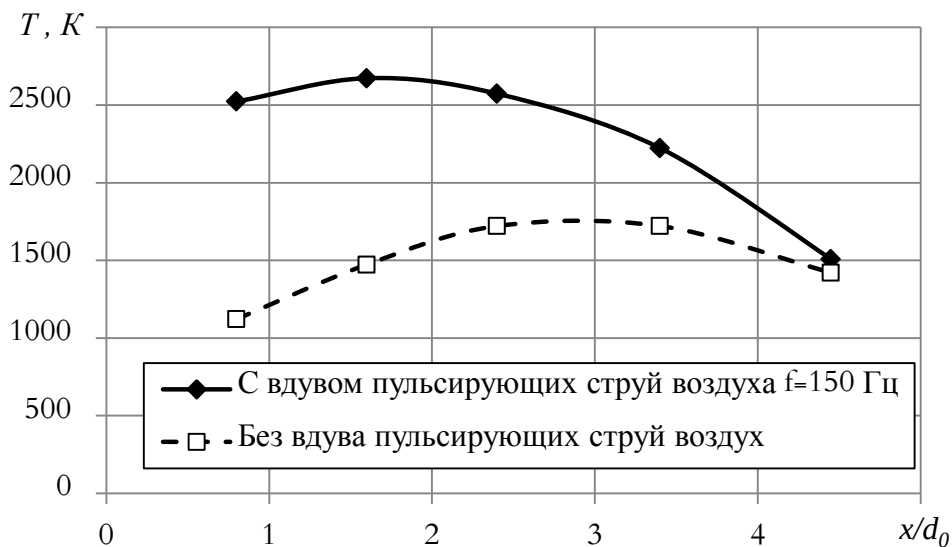


Рисунок 6.3 – Температура на оси форкамеры

$$D_K = 0,08 \text{ м}; \alpha = 0,37;$$

Ядро горения переместилось от среза камеры к плоскости внезапного расширения, о чем свидетельствуют результаты термометрирования наружной поверхности стенки камеры. Так, в варианте без вдува участок с максимальным значением температуры наружной поверхности стенки камеры $T_{cm} = 650 \text{ К}$ располагался на расстоянии $x / d_0 = 2,7 \dots 4,0$, а в варианте с вдувом пульсирующих струй воздуха участок с $T_{cm} = 850 \text{ К}$ был зафиксирован при $x / d_0 = 1,7 \dots 3,0$.

Для определения влияния вдува стационарных струй воздуха и частоты псевдотурбулентных пульсаций на профиль температур в выходном сечении камеры сгорания были проведены отдельные испытания.

В данных испытаниях, как без вдува, так и с вдувом пульсирующих струй воздуха, значение коэффициента избытка воздуха α поддерживалось постоянным $\approx 0,23$. Результаты испытаний представлены на рисунке 6.4.

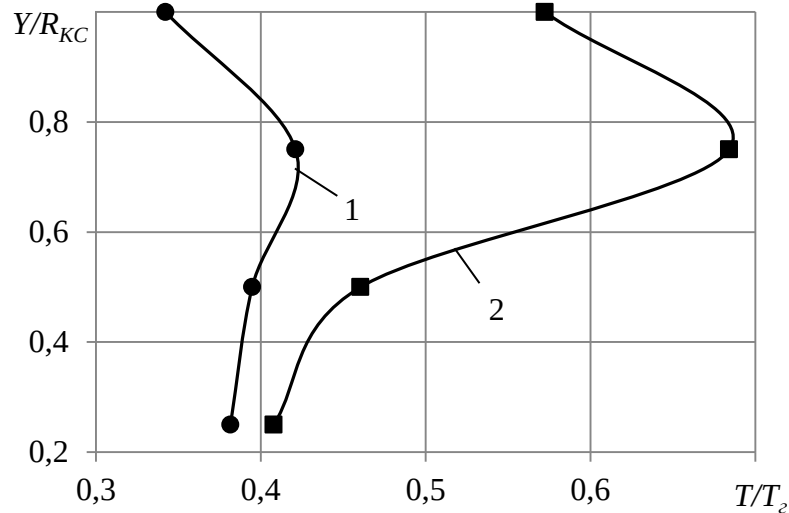


Рисунок 6.4 - Профиль температур в выходном сечении форкамеры

$$D_{KC} = 0,08 \text{ м}; U_0 = 65 \text{ м/с}; \alpha = 0,23;$$

1 - без вдува; 2 - с вдувом $f = 300 \text{ Гц}$

Из рисунка видно, что профили температур отличаются друг от друга. В варианте с вдувом пульсирующих струй воздуха он «вытянут» в области вдува, при этом уровень температуры увеличился. Это связано с изменением гидродинамики течения в камере и интенсификацией процессов массо- и теплообмена в зоне горения, а следовательно, и увеличением скорости горения аэровзвеси, поскольку за счет вдува дискретных пульсирующих струй воздуха в слой смешения за плоскостью внезапного расширения увеличилась поверхность горения.

За счет выбора частоты можно либо усиливать, либо ослаблять интенсивность смешения в струях [109]. Самым чувствительным участком струи является слой смешения вблизи кромки сопла $x/d = 0 \dots 0,5$, именно здесь периодические возбуждения генерируют вихри которые, в конечном

счете, определяют ослабление или усиление интенсивности перемешивания в пределах начального участка.

На рисунке 6.5 показаны профили температур в выходном сечении форкамеры при вдуве стационарных $f = 0$ Гц и пульсирующих струй воздуха $f = 400$ Гц при постоянном составе смеси $\alpha = 0,4$.

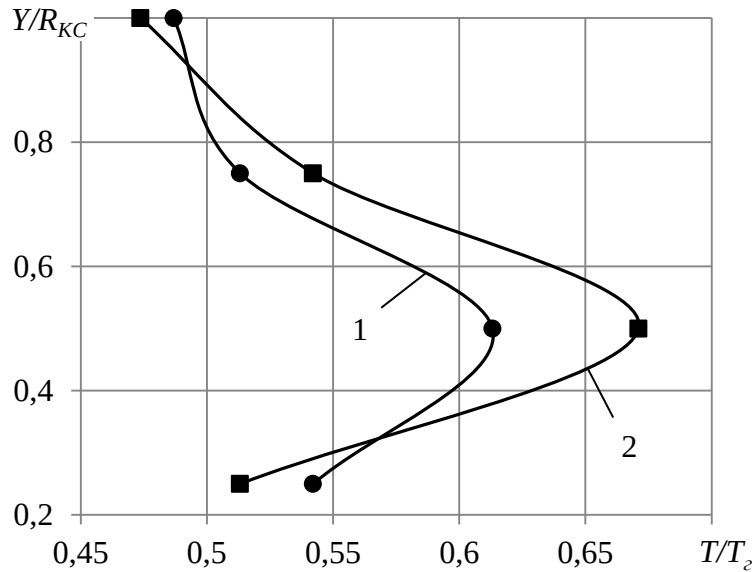


Рисунок 6.5 - Влияние f на профиль температур

$$D_K = 0,08 \text{ м}; U_0 = 65 \text{ м/с}; \alpha = 0,4;$$

1 - $f = 0$ Гц; 2 - $f = 400$ Гц

Из рисунка видно, что при вдуве пульсирующих струй с $f = 400$ Гц профиль температур более «вытянут» в продольном направлении, где наблюдается максимальное значение температуры. Этот факт объясняется тем, что с ростом частоты от 0 до 400 Гц число Струхала увеличивается с 0 до 0,26. Низкочастотные возмущения ($Sh = 0,2 \dots 0,6$) модулируют исходные (естественные) высокочастотные возмущения в слое смешения вблизи выходного отверстия камеры, что в конечном счете приводит к более раннему образованию когерентных структур и их последующему более интенсивному по сравнению с невозбужденным потоком росту [110].

Для определения влияния частоты псевдотурбулентных пульсаций на процесс горения были измерены профили температур в выходном сечении камеры при вдуве в слой смешения пульсирующих струй воздуха с различной частотой. Дальнейшие испытания на частотах 50, 150 и 500 Гц при постоянном значении коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 0,35$) показали, что увеличение частоты пульсирующих струй воздуха до 500 Гц ведет к снижению температуры и выравниванию профиля в выходном сечении камеры. Это обусловлено тем, что процесс теплоотвода от зоны горения начинает превалировать над процессом интенсификации горения за счет улучшения массообмена. Пламя «задувается», акустические колебания выравнивают температурное поле в форкамере, вследствие чего ядро горения охлаждается, а теплоотдача на стенки камеры увеличивается.

Поскольку в данной работе осуществлялся критический подвод «вторичного» воздуха, можно утверждать, что выравнивание профиля температур при $f = 500$ Гц по сравнению с профилем, полученным на частотах 50 и 150 Гц при одинаковом значении α , обусловлено воздействием частоты нестационарных воздействий на процесс мелкомасштабного турбулентного смешения в пограничном слое струи. Следовательно, варьируя частотой вдува дискретных пульсирующих струй воздуха, можно управлять профилем температур на выходе из форкамеры.

Известно, что удельная тяга является одним из важнейших параметров, который позволяет судить о степени совершенства рабочего процесса и эффективности применяемого топлива. Для определения влияния частоты нестационарных воздействий на процесс сгорания аэрозвеси частиц алюминия были проведены измерения удельной тяги.

На рисунке 6.6 показана зависимость удельной тяги от частоты вдува пульсирующих струй воздуха.

При увеличении частоты с 0 до 300 Гц значение удельной тяги уменьшается, а затем, с дальнейшим ростом частоты, снова увеличивается.

Снижение удельной тяги при наложении нестационарных воздействий на дискретные струи воздуха можно объяснить совпадением частоты вдува пульсирующих струй воздуха с дискретной частотой больших когерентных структур ($f = 250 \dots 450$ Гц), возникающих в каналах с внезапным расширением.

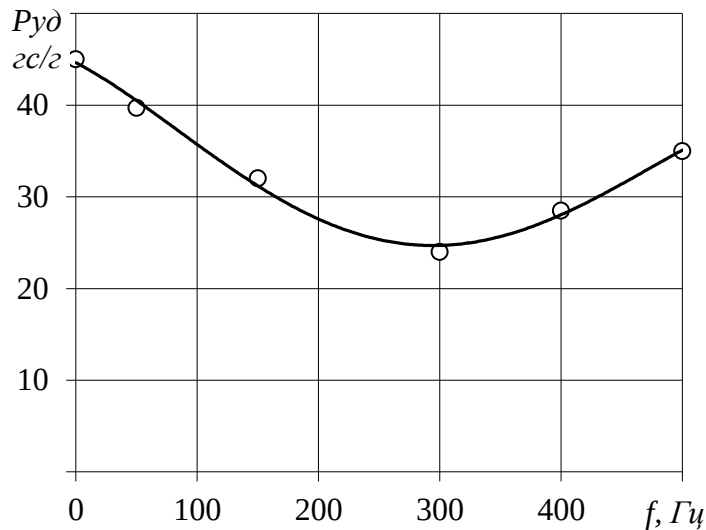


Рисунок 6.6 - Зависимость $P_{y\partial} = f(f)$:

ПМГ марки АМД-50; $D_K = 0,08$ м

Влияние частоты пульсирующих струй воздуха на пределы горения алюминиево-воздушной смеси показано на рисунке 6.7, где на оси абсцисс отложена частота f , а на оси ординат - значения α , при которых происходил срыв пламени.

Из рисунка видно, что с увеличением частоты α уменьшается, достигая своего минимума при $f = 250 \dots 450$ Гц, т.е. смещается в область «богатых» смесей, что означает сужение границ срыва пламени. При дальнейшем увеличении частоты до 500 Гц происходит увеличение α и соответственно расширение границ устойчивого горения.

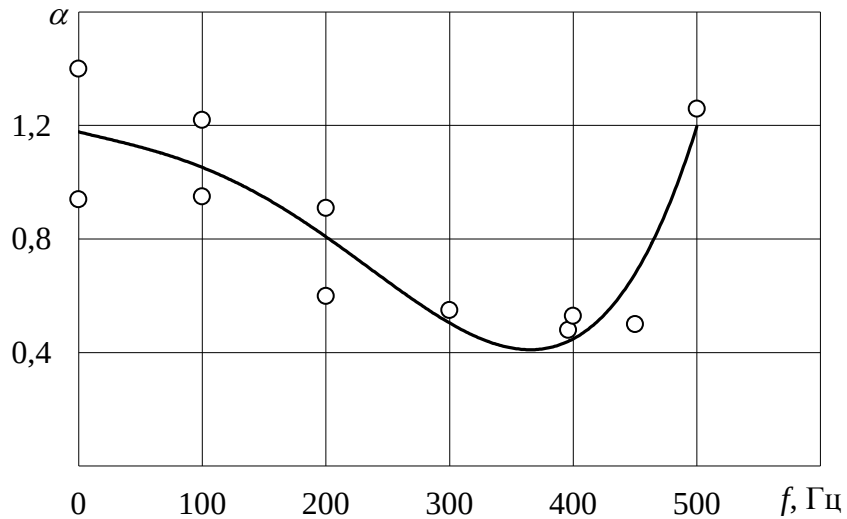


Рисунок 6.7 - Влияние f на пределы горения:

Алюминиево-воздушного потока; $D_K = 0,08$ м

Ухудшение стабилизации при вдуве пульсирующих струй воздуха с $f = 250 \dots 450$ Гц объясняется уменьшением длины приосевой рециркуляционной зоны, а следовательно, и уменьшением τ_k частиц алюминия основного потока с высокотемпературными продуктами горения зоны рециркуляции.

Таким образом, полученные результаты исследований показали, что посредством вдува дискретных стационарных воздуха в слой смешения зоны рециркуляции и основного потока аэровзвеси можно управлять гидродинамикой течения и соответственно тепломассообменными процессами

Варьируя частотой псевдотурбулентных пульсаций, достигается возможность управлять характеристиками горения аэровзвеси частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением.

На основе полученных результатов исследований была оформлена заявка и получен патент на полезную модель № 112348 «Фронтное устройство камеры сгорания реактивного двигателя на порошкообразном металлическом горючем.

6.3 Исследование характеристик горения алюминиево-воздушного факела

В противоположность ламинарному факелу длина диффузионного факела не изменяется при увеличении скорости в горелке и при истечении в неограниченное пространство зависит главным образом от типа используемого топлива и диаметра горелки [111].

Первоначальным объектом исследования был затопленный турбулентный диффузионный алюминиево-воздушный факел, который формировался за камерой с внезапным расширением диаметром 0,033 м.

В данных экспериментах использовался метод прожигания стальных сеток, которые устанавливались на различных расстояниях от среза камеры сгорания. Величина, $x/d_{КС}$ ($d_{КС}$ - диаметр камеры сгорания), определялась как точка пересечения изотермы, соответствующей температуре плавления стали, с осью факела. Значения расхода и скорости воздуха в испытаниях поддерживались постоянными за счет одинаковой величины давления воздуха на входе в камеру, а состав смеси варьировался расходом порошка алюминия. На рисунке 6.8 показано влияние коэффициента избытка воздуха α на относительную длину алюминиево-воздушного факела $x/d_{КС}$.

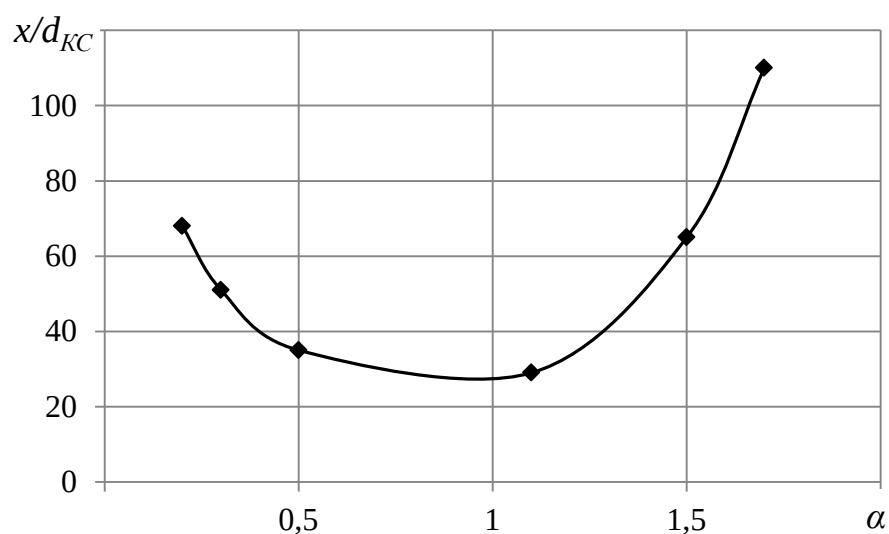


Рисунок 6.8 – Зависимость $x/d_{КС} = f(\alpha)$

порошок - АСД-1

Из рисунка видно, что для алюминиево-воздушного факела так же как и пылеугольного [112,113], при значении коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,2 \dots 1,4$ зона горения минимальна, дальнейший рост α ведет к увеличению длины факела, поскольку в кинетическом режиме при неизотермических условиях возрастание α снижает температурный уровень процесса, а следовательно, и скорость горения в целом.

Изменение температуры на оси затопленного прямоточного алюминиево-воздушного факела в зависимости от значения α показано на рисунке 6.9.

Из рисунка видно, что максимальные значения температуры на оси факела с ростом α смещаются от среза форкамеры. Так, при $\alpha = 0,7$ максимальное значение температуры зафиксировано на расстоянии $0,5 \dots 1,5$ м ($X/d = 20$), а при $\alpha = 2,6$ - на расстоянии $1,8 \dots 3,8$ м ($X/d = 35$), от среза камеры.

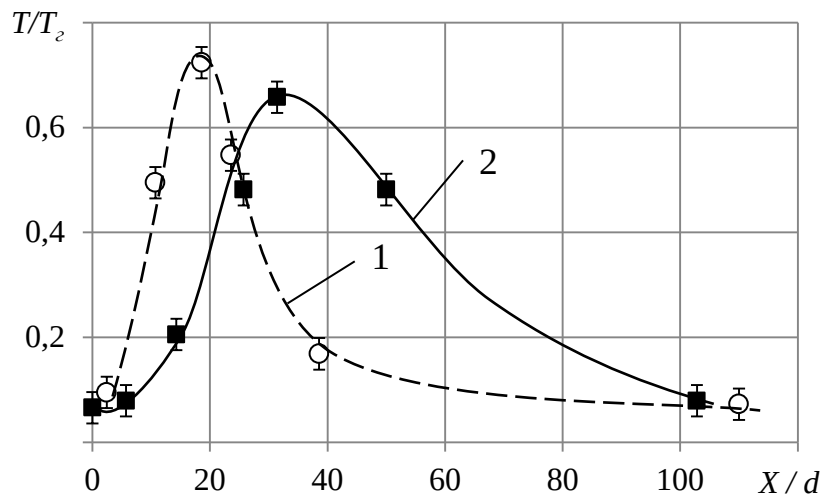


Рисунок 6.9 - Изменение температуры на оси факела

1 - $\alpha = 0,7$; 2 - $\alpha = 2,6$

Температура, зафиксированная методом прожигания вольфрамовых сеток в [2] и полученная в [22] пирометрическим способом, превышает 3000 К и соответствует температуре кипения окиси алюминия (3600...3850 К).

На характер изменения длины зоны горения от избытка воздуха α влияет химическая реакционная способность топлива [113]. Было отмечено,

что резко сокращается длина зоны горения с уменьшением начального радиуса частиц алюминия. Это связано с увеличением внешней реакционной поверхности частиц. Следовательно, начальный размер частиц является одним из важных факторов интенсификации процесса сгорания порошкообразного алюминия в турбулентном потоке воздуха.

Установлено также, что замена порошка АСД-1 на полидисперсную топливную композицию, состоящую из различных порошков, приводит к увеличению длины факела с 1,5 до 2,5 м при тех же режимных параметрах камеры.

Процесс горения дисперсного алюминия в факеле характеризуется полями температур, концентрациями реагирующих веществ, скоростями и степенью выгорания в поперечных сечениях факела.

На рисунке 6.10 представлено распределение температуры в поперечных сечениях алюминиево-воздушного факела.

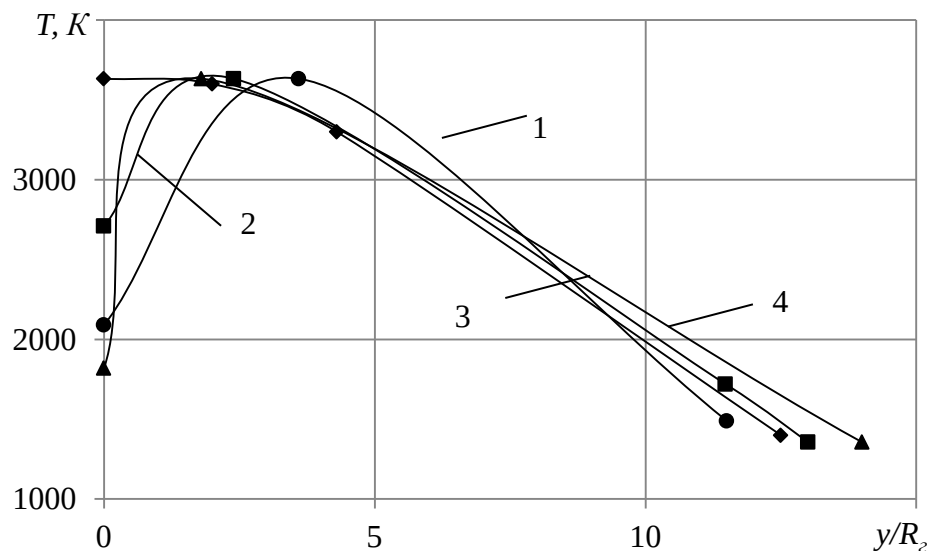


Рисунок 6.10 - Профили температуры по длине факела
порошок АСД-1; $\alpha = 0,1$; 1 - $x/d_2 = 20$; 2 - 35; 3 - 45; 4 - 50

Приведенные поля температур отражают структуру прямоточного факела с периферийным зажиганием. На представленных трех сечениях

факела по мере перехода от оси к его внешней границе температура резко повышается. Максимальные значения температуры соответствуют величине $y / R_{KC} = 0,25 \dots 0,4$

По мере перехода от одного сечения к другому пламя распространяется в глубь факела и доходит до его оси в сечении $x/d_{KC} = 45$, в котором температура на оси равна 3633 К, затем с ростом x/d_{KC} снижается.

Горение потока распыленного твердого топлива в общем случае сопровождается изменением температур потока по длине факела [113]. Локальные температурные условия в ряде случаев, например в зонах воспламенения, догорания топлива и др., являются определяющими. Средний температурный уровень в объеме горения вообще не дает правильного представления о закономерностях выгорания топлива.

Таким образом, при выгорании дисперсного алюминия в турбулентном потоке газообразного окислителя изменение одного параметра, например избытка воздуха, влечет за собой изменение ряда других, в первую очередь температурных и гидродинамических характеристик потока. Поэтому только комплексный анализ позволяет правильно определить закономерности развития этого процесса.

Скорость горения топлива и, в конечном счете, полнота его выгорания во многом зависят от условий воспламенения частиц и теплового уровня в начальной зоне горения. Одним из наиболее распространенных случаев повышения температуры среды в зоне воспламенения топлива служит рециркуляция части нагретых продуктов сгорания в начальную область зоны горения. Как правило, рециркуляция возникает в результате ввода воздуха закрученной струей, создающей подсос горячих газов в центральную часть зоны воспламенения [71].

6.4 Метод управление характеристиками горения алюминиево-воздушного факела

Скорость горения дисперсного алюминия (Al) и соответственно полнота его выгорания во многом будет зависеть от условий воспламенения частиц и теплового уровня в начальной зоне горения. Посредством закрутки воздушного потока и организацией центральной тороидальной рециркуляционной зоны (ЦТРЗ) можно увеличить время пребывания частиц алюминия камере, повысить температуру в зоне реакции и осуществлять процесс горения в парофазном режиме.

С целью организации в начальной зоне основной камеры ЦТРЗ и возможностью управления характеристиками горения аэрозвеси частиц алюминия, форкамеру с внезапным расширением дополнили закручивающим устройством.

На начальном этапе были проведены исследования влияния геометрических параметров закручивающего устройства на размеры обратных токов за фронтовым устройством в изотермических условиях. Было определено влияние формы насадки и количества лопаток завихрителя (параметра закрутки S) на размер и форму зоны обратных токов.

Так, результаты экспериментов при одинаковом параметре закрутке $S = 1,8$ без насадки и с цилиндрической насадкой показали, что длина зоны рециркуляции, полученная с завихрителем без насадки, была 166 мм, с цилиндрической насадкой (длиной 65 мм) - 190 мм.

Этот факт объясняется тем, что в потоке за кольцевым лопаточным завихрителем (с цилиндрической выходной частью) при малых значениях параметра закрутки S образуется длинная тонкая зона обратных токов (при $S \approx 0,7$; $L \approx 3,5 \cdot d$).

По мере роста интенсивности закрутки узкая зона обратных токов удлиняется и достигает максимальной протяженности приблизительно при $S = 1,5 \dots 2,0$, затем при $S > 2$ становится шире и короче [71].

В опытах при тех же значении параметра закрутки S с диффузорной насадкой длиной 200 мм и углом раскрытия 60° длина зоны обратных токов составила ~ 350 мм. Следовательно, длина зоны обратных токов с диффузорной насадкой по сравнению с вариантом без насадки увеличилась вдвое. Наши результаты подтверждаются данными [114], где отмечено, что диффузорное сопло, установленное на выходе из закручивающего устройства, значительно увеличивает рециркуляционную зону. Так, диффузор с полууглом раскрытия 35° при относительной длине $L_\delta / d_z = 0,7$ увеличивает максимальный диаметр зоны обратных токов более чем в два раза, а при значении $L_\delta / d_z = 3,0$ - более чем в три раза.

На фронтальном устройстве с диффузорной насадкой определялось влияние параметра закрутки S на размеры зоны рециркуляции. Было получено, что с увеличением параметра закрутки S от 1,8 до 2,0 длина зоны рециркуляции увеличивается с 350 до 400 мм.

Таким образом, исследования аэродинамической картины течения за форкамерой с завихрителем и различными типами насадок показали возможность образования за ними ЦТРЗ, форму, размеры и интенсивность которой можно изменять в широком диапазоне конструкцией насадки и параметром закрутки S .

Следующий этап исследования заключался в определении эффективности применения завихрительных устройств в условиях работы фронтального устройства в спутном потоке воздуха [115,116].

На рисунке 6.11 показаны различные варианты конструкций фронтальных устройств с кольцевыми лопаточными завихрителями и прямыми лопатками, расположенными под углом 45° к оси.

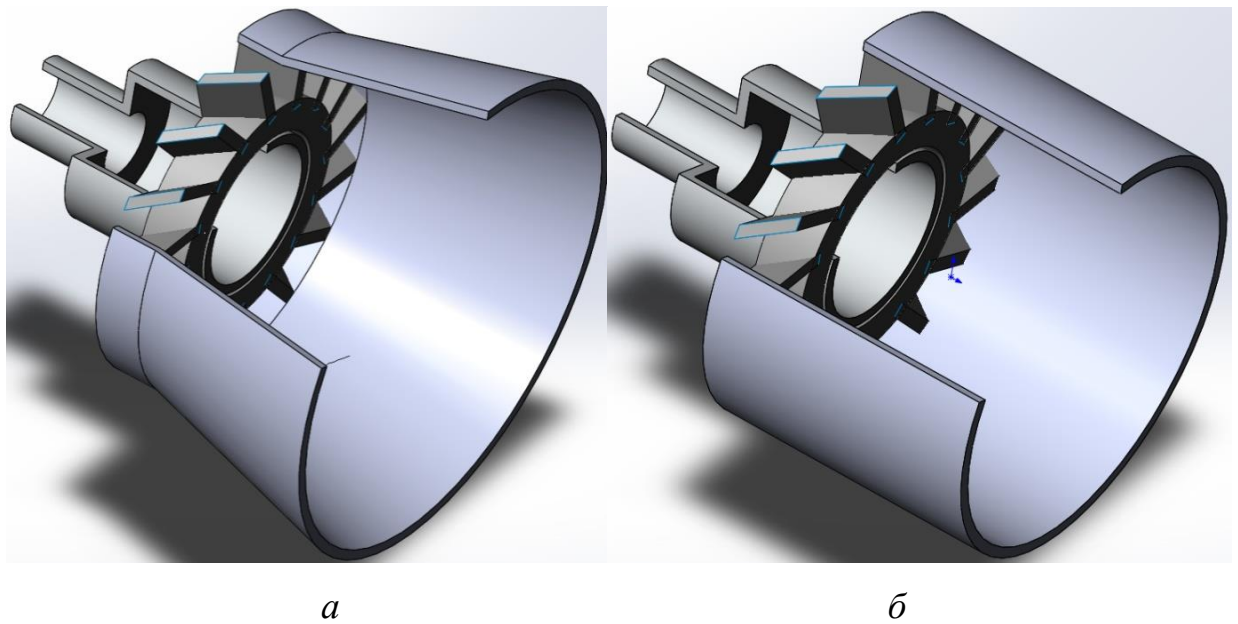


Рисунок 6.11 – Фронтное устройство

а) - диффузорной насадкой; б) - цилиндрической насадкой

За лопаточным завихрителем на срезе фронтного устройства устанавливались съемные насадки различной конструкции – диффузорная и цилиндрическая, длиной 200мм. Параметр закрутки S варьировался посредством изменения числа сменных плоских лопаток в кольцевом завихрителе.

Испытания проводились на открытом стенде Федерального казенного предприятия «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем» (ФКП «ГкНИПАС»), в условиях окружающей среды, при атмосферном давлении $P_H = 447...450$ мм рт. ст. и температуре $T_H = 27...30^\circ\text{C}$. Характеристики стенда позволяли обеспечивать скорость спутного потока воздуха в диапазоне $M = 0...0,6$.

Измерения температуры в факеле осуществлялись при помощи тепловизора AGA-782.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6.12

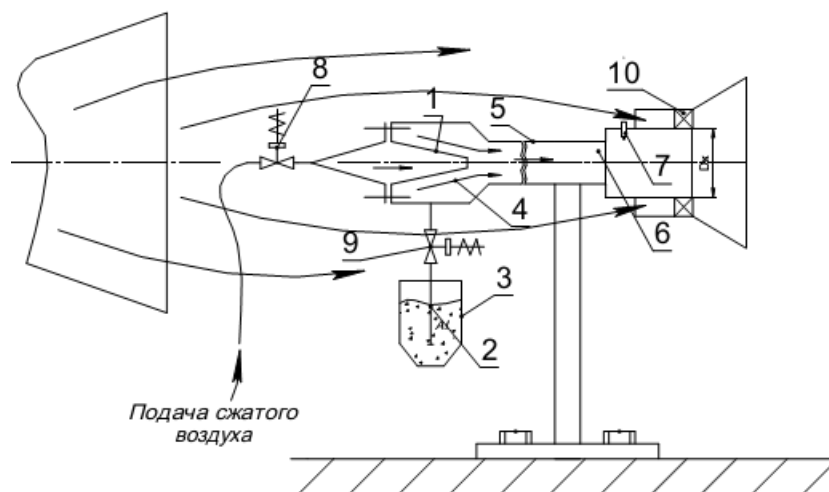


Рисунок 6.12- Схема экспериментальной установки

1 - сопло эжектора; 2 - трубка забора порошка; 3 - бункер; 4 - приемная камера эжектора; 5 - камера смешения эжектора; 6 – форкамера; 7 - свеча зажигания; 8 – электроклапан компрессора; 9 – электроклапан подачи порошка; 10 – лопаточный завихритель

Изменение температуры вдоль оси алюминиево-воздушного факела в спутном потоке воздуха с закруткой и без закрутки показано на рисунке 6.13.

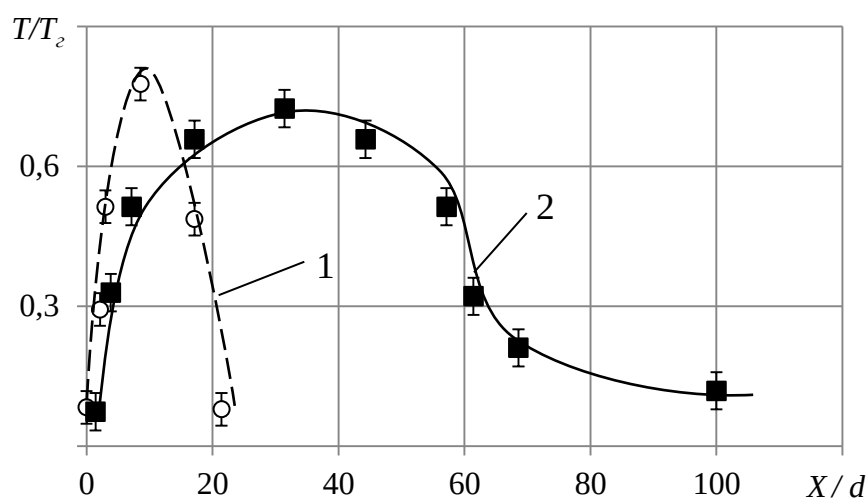


Рисунок 6.13 - Изменение температуры на оси факела:

$\alpha = 2,4$; 1 - закрученный факел $S = 2,0$;

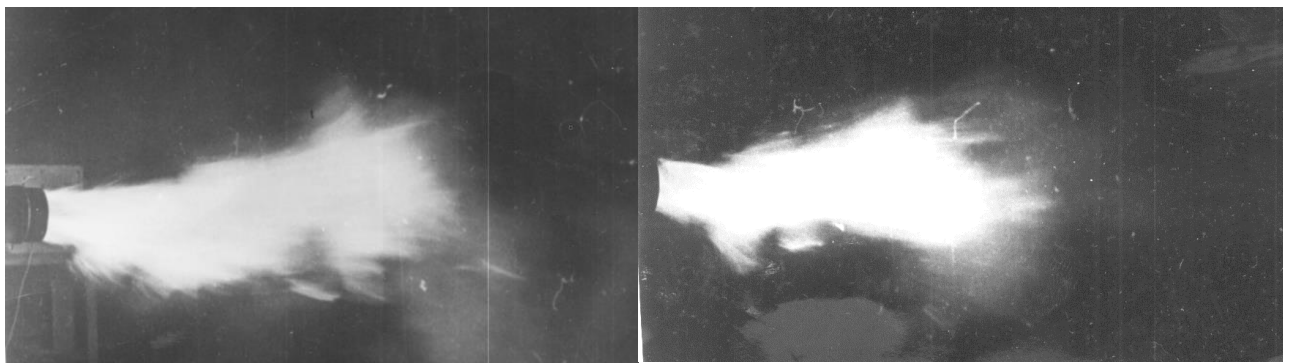
2 - прямоточный факел

Из рисунка видно, что максимальные значения температуры в закрученном алюминиево-воздушном факеле соответствуют $X/d = 10$, а в прямоточном при значении $X/d = 30$, и длина при этом факела сократилась в 5 раз.

Полученные результаты наших испытаний [115,116] совпадают с данными [71], где отмечено, что в закрученном факеле, несмотря на большой поток массы, смешение происходит быстрее, чем в прямоточном и рост температуры в закрученном потоке начинается раньше, чем в прямоточном - на расстоянии одного диаметра за срезом горелки.

Установлено, что конструктивные особенности фронтального устройства (конструкция насадки) влияют на параметры алюминиево-воздушного факела в спутном потоке воздуха.

Влияние конструктивных параметров горелочного устройства (конструкции насадки) на алюминиево-воздушный факел в спутном потоке воздуха проиллюстрировано на рисунке 6.14.



a

б

Рисунок 6.14 - Алюминиево-воздушный факел
в спутном потоке воздуха [117, 118]

$M = 0,4$; $\alpha = 2,4$; параметр закрутки $S = 2,0$;

a - цилиндрическая насадка; *б* - диффузорная насадка

Изменение температуры вдоль оси алюминиево-воздушного факела в зависимости от конструкции насадки показано на рисунке 6.15.

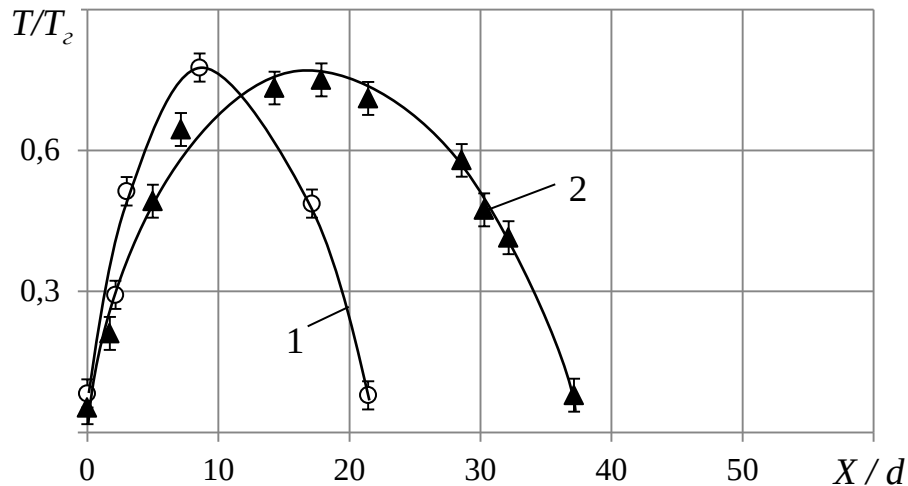


Рисунок 6.15 - Зависимость температуры на оси факела

от формы насадки $\alpha = 2,4$; $M = 0,4$; $S = 2,0$

1 - диффузорная насадка; 2 - цилиндрическая насадка

Из рисунка видно, что длина факела в опытах с диффузорной насадкой, по сравнению с цилиндрической уменьшается с $X/d = 37$ до $X/d = 20$, (с 2,5 до 1,5м), Данный факт свидетельствует об интенсификации процесса и сокращении длины выгорания факела.

Это объясняется тем, что диффузорное сопло значительно увеличивает рециркуляционную зону в диаметре. Поток массы в обратном течении также возрастает, и выгорание факела происходит на более коротком расстоянии от среза горелки. Кроме того, установка диффузора на выходе из закручивающего устройства может приводить к уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления на 20 - 30 % [117].

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что геометрическими параметрами и характеристиками горения алюминиево-воздушного факела можно управлять посредством закрутки обтекающего воздушного потока посредством кольцевого лопаточного завихрителя установленного в плоскости выходного сечения форкамеры.

6.5 Выводы

1. Разработан метод управления процессом горения в форкамере с внезапным расширением основанный на вдуве дискретных струй воздуха в слой смешения зоны рециркуляции и основного потока аэровзвеси, который позволяет изменять гидродинамику течения; варьируя частотой псевдотурбулентных пульсаций в диапазоне $f = 0 \dots 500$ Гц, можно управлять характеристиками горения.

2. Выявлен диапазон частот псевдотурбулентных пульсаций накладываемых на дискретные струи воздуха $f = 250 \dots 450$ Гц, при котором происходит снижение полноты сгорания и сужение границ устойчивого горения. Отрицательное влияние на характеристики горения аэровзвеси частиц алюминия обусловлено явлением резонанса, т.е. совпадением частоты вдува пульсирующих струй воздуха с дискретной частотой когерентных структур, возникающих в каналах с внезапным расширением.

3. Метод, основанный на закрутке воздушного потока, посредством кольцевого лопаточного завихрителя установленного в плоскости выходного сечения форкамеры позволяет управлять геометрическими параметрами и характеристиками горения алюминиево-воздушного факела. Длина выгорания алюминиево-воздушного факела с параметром закрутки воздушного потока $S = 1,8 \dots 2,0$ сокращается в 5 раз по сравнению с факелом без закрутки, а температура на оси увеличивается на 200 К.

4. Конструктивное сочетание форкамеры, представляющей собой канал с внезапным расширением и кольцевого лопаточного завихрителя с диффузорной насадкой можно использовать в качестве фронтального устройства в камере сгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных в настоящей диссертационной работе результатов исследований по воспламенению, горению и стабилизации пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия разработаны методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия. Данные методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия позволяют организовать эффективные внутрикамерные процессы в двигательных и технологических установках.

Организация рабочего процесса в камере сгорания при давлении 0,1 МПа, дает возможность использовать простую и надежную эжекторную систему подачи порошка алюминия в камеру по сравнению с вытеснительной.

Для инициирования процесса горения в форкамере предложено применять систему зажигания со свечой СПН-4-3Т с энергией электрического разряда $W = 0,05$ Дж, которая обеспечивает надежное зажигание в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

В качестве стабилизатора пламени в камере сгорания необходимо использовать внезапное расширение канала. Который позволяет стабилизировать фронт пламени в более широких диапазонах, по сравнению с плохобтекаемым телом и перфорированными пластинами, как по скорости потока аэровзвеси, так и по составу.

Полученные результаты исследований показали, что посредством вдува дискретных стационарных и пульсирующих струй воздуха в слой смешения зоны рециркуляции и основного потока аэровзвеси можно управлять характеристиками горения в форкамере с внезапным расширением.

Конструктивное сочетание форкамеры, представляющей собой канал с внезапным расширением, и кольцевого лопаточного завихрителя с диффузорной насадкой можно рекомендовать в качестве фронтального устройства. Посредством закрутки воздушного потока и организацией центральной тороидальной рециркуляционной зоны (ЦТРЗ) можно повысить

тепловой уровень в начальной зоне основной камеры и сместить зону горения к оси. Это позволит повысить температуру в начальной зоне камеры и поддерживать высокотемпературный паро- или газофазный режим горения, а также увеличить срок службы оборудования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫВОДЫ

Научная значимость работы состоит в том, что получены новые знания о скорости распространения пламени в аэровзвеси частиц алюминия. Впервые выявлен второй максимум на кривой зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха. Второе максимальное значение скорости распространения пламени при $\alpha \approx 1,0$ совпадает с максимальными значениями тепловыделения и температуры горения аэровзвеси частиц алюминия стехиометрического состава, полученные термодинамическими расчетами Малининым В.И. и др.

Характерная особенность зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха подтверждается данными полученными при определении границ устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия. Которые показали, что кривая зависимости скорости срыва пламени от коэффициента избытка воздуха $U_0 = f(\alpha)$ имеет два максимума, один в области «богатых» смесей ($\alpha \approx 0,12$), второй - в области стехиометрического состава ($\alpha \approx 1,0$).

Полученные результаты исследований и разработанные на их основе методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия послужили основой для создания совместно с Федеральным казенным предприятием «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем» специальной энергетической установки.

На основе результатов полученных в настоящее диссертационной работы сделаны следующие выводы:

ВЫВОДЫ

1. В результате проведённого компьютерного моделирования течения в вихревой камере сгорания установлены оптимальные значения параметра закрутки $S \approx 1,8 \dots 2,0$, при которой время пребывания частиц алюминия в камере сгорания максимально.

2. Экспериментально установлено, что в форкамере с внезапным расширением среднее время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции в 3 раза больше чем в основном потоке аэровзвеси.

3. Полученные результаты экспериментальных исследований структуры течения потока аэровзвеси частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением позволили определить оптимальное место установки свечи зажигания $L_{св} = (0,5 \dots 1,2) \cdot H$ в зоне рециркуляции.

4. Определен критический радиус начального очага зажигания $R_{кр} \geq 1 \text{ мм}$ для порошка алюминия АСД – 4 и условие воспламенения $R_{кр} \geq 0,5 \cdot b_n$, а также критический радиус начального очага зажигания $R_{кр} \geq 5 \text{ мм}$ для порошка алюминия АСД – 1 и условие воспламенения $R_{кр} \geq 2,5 \cdot b_n$.

5. Установлено, что границы зажигания в потоке аэровзвеси расширяются при уменьшении диаметра камеры сгорания, уменьшении среднего размера частиц алюминия и сужаются при увеличении скорости потока. С увеличением начальной турбулентности границы зажигания в потоке аэровзвеси с частицами АСД-4 сужаются и расширяются с частицами АСД-1.

6. Определены границы устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения состава $\alpha = 0,01 \div 3,0$. Установлено, что кривая зависимости $U_0 = f(\alpha)$ имеет два максимума один в области «богатых» смесей, второй - в области стехиометрических составов.

7. Предложен критерий срыва пламени по модели, основанной на балансе теплообмена рециркуляционной зоны с основным потоком аэровзвеси в виде

$S = A_1 (\text{Re}_{кр})^n$, $n = 0,4$ и $A_1 = 1,2$ и которое в логарифмических координатах хорошо описывает экспериментальные данные прямой линией.

8. Разработан метод управления процессом горения в форкамере с внезапным расширением основанный на вдуве дискретных струй воздуха в слой смешения зоны рециркуляции и основного потока аэровзвеси, который позволяет изменять гидродинамику течения; варьируя частотой псевдотурбулентных пульсаций в диапазоне $f = 0 \dots 500$ Гц, можно управлять характеристиками горения.

9. Выявлен диапазон частот псевдотурбулентных пульсаций накладываемых на дискретные струи воздуха $f = 250 \dots 450$ Гц, при котором происходит снижение полноты сгорания и сужение границ устойчивого горения. Отрицательное влияние на характеристики горения аэровзвеси частиц алюминия обусловлено совпадением частоты вдува пульсирующих струй воздуха с дискретной частотой когерентных структур, возникающих в каналах с внезапным расширением.

10. Метод, основанный на закрутке воздушного потока, посредством кольцевого лопаточного завихрителя установленного в плоскости выходного сечения форкамеры позволяет управлять геометрическими параметрами и характеристиками горения алюминиево-воздушного факела. Длина выгорания алюминиево-воздушного факела с закруткой воздушного потока сокращается в 5 раз по сравнению с факелом без закрутки, а температура на оси увеличивается на 200 К.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Малинин, В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих [Текст] / В.И. Малинин // Пермь: УрО РАН. 2006. – 243 с.
2. Егоров, А.Г. Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок [Текст] / А.Г. Егоров // Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2004. – 375 с.
3. Ягодников, Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов [Текст] / Д.А. Ягодников // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. – 432 с.
4. Крюков А.Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции энергоустановок на порошковом горючем к технологиям получения ультра-и нанодисперсных материалов [Текст] / А.Ю. Крюков // Пермь: ПГТУ, 2004. 175 с.
5. Maggi F. Activated aluminum powders for space propulsion [Text] / F. Maggi, S. Dossi, C. Paravan, L.T. Deluca, M. Liljedahl // Powder Technology. 2015. Vol. 270. Part A. № 2. pp 46–52.
6. De luca l.t.Characterizationand combustion of aluminum nanopowdersinenergetic systems [Text] / L.T. De luca, L. Galfetti, F. Maggi, G. Colombo, C. Paravan, A. Reina, S. Dossi, M. Fassina, A. Sossi // Metal Nanopowders: Production, Characterization, And Energetic Applications. 2014. pp. 301-410.
7. Петренко, В.И. Регулируемые ПВРД на порошкообразных металлических горючих – новое перспективное направление в реактивном двигателестроении [Текст] / В.И. Петренко, В.И. Малинин // Материалы IX Всероссийской конференции: Исследование, проектирование и отработка регулируемых энергоустановок. Уфа, 2001. С. 11–24.
8. Петренко, В.И. ПВРД на порошкообразных металлических горючих – перспективное направление улучшения баллистических характеристик управляемых ракет [Текст] / В.И. Петренко, В.И. Малинин //

Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. Томск: ТГУ, НИИПММ, 2002. С. 94–98.

9. Малинин В.И. Организация внутрикамерных процессов в двигательных и технологических установках на металлических горючих. Автореферат дисс. на соискание учёной степени доктр. техн. наук. Пермь: ПГТУ, 2007. 51 с.

10. Крюков, А.Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции прямоточных воздушно-реактивных двигателей на порошковом горючем для конверсионного использования [Текст] / А.Ю. Крюков // Автореферат дисс. на соискание учёной степени канд. техн. наук. Пермь: ПГТУ, 2004. – 18 с.

11. Малинин В.И. Получение оксида с заданными свойствами методом сжигания аэрозвеси порошка алюминия. Автореферат дисс. на соискание учёной степени канд. техн. наук. Пермь: ПГТУ, 2003. 16 с.

12. Zhou H. Combustion synthesis for nanometer spinel lithium composite [Text] / H. Zhou, J. Xie, X. Xie, G. Tang, K. Li, M. Qiu // Integrated Ferroelectrics. Gordon and Breach Science Publishers. 2013. Vol. 147. № 1. pp. 1–7.

13. Reddy R.G. Processing of nanoscale materials [Text] / R.G. Reddy // Rev. Adv. Mater. Sci. № 5. 2003. pp. 121–133.

14. Chen Shizhu. Preparation of nanosized metal-oxide ultrafine powders by atomizing-combustion technique [Text] / Chen Shizhu, Yin Zhimin // Journal of Central South University of Technology. 2007. Vol. 5. № 2. pp. 79–81.

15. Sangsun Yang. A flame metal combustion method for production of nanoparticles [Text] / Sangsun Yang, Yoon-Hyung Jang, Chang Hyuk Kim, Changseon Hwang, Jeonghoon Lee, Sukbyung Chae, Sekwon Jung, Mansoo Choi // Powder Technology. 2010. Vol. 197. № 3. pp. 170–176

16. Ягодников Д.А. Организация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов в камерах сгорания реактивных двигательных установок. Диссертация ... д-ра техн. наук. М.: МГТУ, 1997. 236 с.

17. Ягодников Д.А. Влияние внешнего электрического поля на горение аэрозвеси частиц алюминия [Текст] / Д.А. Ягодников, А.В. Воронежский // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34. № 6. С. 23–28.

18. Малинин, В.И. Воспламенение и горение аэрозвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия [Текст] / Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. // Физика горения и взрыва. Т.38, № 5, 2002. С. 41–51.

19. Шатиль А.А. Сжигание природного газа в камерах сгорания газотурбинных установок. - Л.: Недра, 1972. - С. 320 .

20. Мержанов, А.Г. Процессы горения и синтез материалов [Текст] / А.Г. Мержанов // Черноголовка. Изд. ИСМАН, 1998. – 512 с.

21. Громов А.А. Горение нанопорошков металлов [Текст] / А.А. Громов, Т.А. Хабас, А.П. Ильин, и др. // Под ред. А.А. Громова. Томск: Дельтаплан. 2008. – 382 с.

22. Похил П.Ф. Горение порошкообразных металлов в активных средах [Текст] / П.Ф. Похил, А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов и др. // М.: Наука, 1972. – 293 с.

23. Ягодников, Д.Я. Организация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов в камерах сгорания реактивных двигательных установок [Текст] / Д.А. Ягодников // Автореф. дис. на соискание учёной степени д-ра техн. наук. М.: МГТУ. 1998. – 32 с.

24. Золотко, А.Н. Синтез наноксидов в двухфазных ламинарных пламенах [Текст] / А.Н. Золотко, Я.И. Вовчук, Н.И. Полетаев и др. // Физика горения и взрыва. Т. 32, №3, 1996. С. 24–33.

25. Агеев Н.Д. Способ получения ультрадисперсного порошка оксида металла [Текст] / Н.Д. Агеев, Я.И. Вовчук, С.В. Горошин, А.Н. Золотко, А.Г. Мержанов, В.Р. Фурсов, В.И. Шевцов // Патент СССР № 1822397 от 1991 г. Бюллетень “Открытия и изобретения” № 22, 1993.

26. Zolotko A.N., Vovchuk J.I., Poletayev N.I., et al. Combustion synthesis of nano-disperse oxides on two-phase laminar flames [Text] / A.N. Zolotko, J.I.

Vovchuk, N.I. Poletayev // Intern. Conf. on Combustion: Abstract. Moscow – St.-Petersburg, 21-26 June 1993. Izhevsk, 1996. P. 13.

27. Бржустовский, Т. Парофазные диффузионные пламена при горении магния и алюминия [Текст] / Т. Бржустовский, И. Гласмен // Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967. С. 91–125.

28. Клячко Л.Я. Горение неподвижной частицы легкокипящего металла [Текст] / Л.Я. Клячко // Физика горения и взрыва. 1969. № 5. С. 404–413

29. Bartlett R.W., Ong J.M., Fassell W.M., Papp A. Combustion and Flame [Text] / R.W. Bartlett, J.M. Ong, W.M. Fassell // Papp A. 1963. V. 7. P. 227.

30. Кудрявцев В. М. Горение металлов при высоких давлениях (трехзонная модель) [Текст] / В.М. Кудрявцев, А.В. Сухов, А.В. Воронежский и др. // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 50–57.

31. Гремячкин В.М. Физические процессы при горении и взрыве [Текст] / В.М. Гремячкин, А.Г. Истратов, О.И. Лейпунский // М.: Атомиздат. 1980. С. 4 – 68.

32. Малинин В.И. Модель горения высокоскоростного потока аэрозвеси частиц алюминия, учитывающая кинетику процессов и особенности накопления окисла [Текст] / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, И.С. Антипин // Химическая физика. 1998. Т. 17, № 10. С. 80–92.

33. Физико-химические свойства элементов. Справочник [Текст] / Под ред. Г.В. Самсонова // Киев: Наукова Думка, 1965. 807 с.

34. Окисление металлов. Т.2 [Текст] / Под ред. Ж. Бенара. Перев. с франц // М.: Металлургия, 1969. 444 с.

35. Свойства элементов. Справ. изд. [Текст] / Под ред. М.Е. Дрица // М.: Металлургия, 1985. 672 с.

36. Ген М.Я. О горении частиц субдисперсного алюминия [Текст] / М.Я. Ген, Ю.В. Фролов, В.Б. Сторожев // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 153–155

37. Гремячкин В.М. К теории воспламенения металлических частиц [Текст] / В.М. Гремячкин // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 3. С. 9–14.

38. Алексеев А.Г. Экспериментальное исследование динамики взаимодействия кислорода с металлами при взрывах аэровзвесей металлических порошков [Текст] / А.Г. Алексеев, И.В. Судакова, Т.И. Циделко // В кн.: Физика аэродисперсных систем. Киев – Одесса: Вищашк. 1982, вып. 24. С. 48–50.

39. Ягодников Д.А. Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащённым металловоздушным смесям [Текст] / Д.А. Ягодников, А.В. Сухов, В.И. Малинин, И.М. Кирьянов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1990, № 1. С. 121–124.

40. Ягодников Д.А. Распространение пламени по аэровзвеси алюминия при пониженных давлениях [Текст] / Д.А. Ягодников, А.В. Воронежский, В.И. Лапицкий // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 23–31.

41. Алексеев А.Г., Судакова И.В. Скорость распространения пламени в аэровзвесах металлических порошков [Текст] / А.Г. Алексеев А.Г., И.В. Судакова // Физика горения и взрыва, 1983. Т. 19, № 5. С. 34–36.

42. Кумагаи. Горение [Текст] / Кумагаи // М.: Химия, 1980. 256 с.

43. Кудрявцев В.М. Распространение фронта химической реакции в двухфазном потоке [Текст] / В.М. Кудрявцев, А.В. Сухов, А.В. Воронежский // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. Вып. 4. Харьков: ХАИ, 1986. С. 66–69.

44. Гусаченко Е.И. Особенность формирования агломератов при горении смесевых композиций [Текст] / Е.И. Гусаченко, В.П. Фурсов, В.И. Шевцов и др. // Физика аэродисперсных систем. Киев-Одесса: Вищашк., 1982. вып. 21. С. 62–66.

45. Седой В.С. Получение высокодисперсных порошков при быстром электрическом взрыве [Текст] / В.С. Седой, В.В. Валевич // Известия вузов. Физика, 1998. №6. С. 70–76.

46. Казанцев М.Ю., Петренко В.И., Малинин В.И. Регулируемая подача порошка металла в камеру воспламенения [Текст] / М.Ю. Казанцев, В.И. Петренко, В.И. Малинин // Сборник тезисов докладов Всероссийской НТК: Аэрокосмическая техника и высокие технологии 2002. Пермь: ПГТУ, 2002. 125 с.

47. Гаршин А.П. Машиностроительная керамика [Текст] / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Г.П. Зайцев, С.С. Семёнов. // СПб: Изд-во СПбГТУ. 1997. – 726 с.

48. Тонкая техническая керамика [Текст] / Под. Ред. Янагида Х. // Япония, 1982: Пер. с японск. М.: Металлургия. 1986. 279 с.

49. Малинин В.И. Влияние параметров окисляющей среды на процесс накопления окисла на поверхности горящих частиц алюминия [Текст] / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, И.С. Антипин // Международная конференция по внутрикамерным процессам и горению: Проблемы конверсии и экологии энергетических материалов (ICOS-96). Россия, С - Петербург, 3-7июня 1996: Сборник материалов в двух частях. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 1997. Ч. 1. С. 33–39.

50. Справочник металлурга по цветным металлам [Текст] / Производство алюминия. М.: Металлургия, 1971. 320 с.

51. Иванов Н.Н. Способ получения порошка оксидов [Текст] / Н.Н. Иванов, А.Н. Иванов // Физика горения и взрыва. 1994. Т.30. № 2. С. 64–71.

52. Лукин А.Я. Расчёт дисперсности продуктов сгорания металлической частицы [Текст] / А.Я. Лукин, А.М. Степанов // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, №3. С. 41–50.

53. Лукин А.Я. Теоретическое исследование процессов образования конденсированных продуктов при горении частиц металла [Текст] / А.Я. Лукин, А.М. Степанов // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, №4. С.45–49.

54. Гусаченко Е.И. Исследование конденсированных продуктов горения магниевых порошков. Зависимость от давления [Текст] / Е.И.

Гусаченко, Л.Н. Стесик, В.П. Фурсов, В.И. Швецов // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, №4. С.548–554.

55. Золотко А.Н. Задержка воспламенения газовзвеси частиц бора [Текст] / А.Н. Золотко, Л.А. Клячко, К.М. Копейка и др. // В кн.: Горение конденсированных систем. Черногловка: Наука, 1977. С. 88–90.

56. Ягодников Д.А. Теоретическое и экспериментальное исследование взаимодействия алюминия с воздухом [Текст] / Д.А. Ягодников, А.И. Вяткин, В.В. Иванов // Вопросы двигателестроения. М.: МГТУ, 1988. С. 11–16.

57. Егоров А.Г. Стабилизация пламени порошкообразного металлического горючего в турбулентном потоке воздуха [Текст] / А.Г. Егоров, Е.Д. Кальней, А.П. Шайкин // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 5. С. 28–35

58. Егоров А.Г. Стабилизация пламени в турбулентном двухфазном потоке [Текст] / А.Г. Егоров // М.: Химическая физика. 2003. Т.22, № 4. С. 70–79.

59. Егоров А.Г. Экспериментальное исследование процессов воспламенения и стабилизации пламени порошкообразного алюминия в камере сгорания с внезапным расширением [Текст] / А.Г. Егоров, К.В. Мигалин, А.П. Шайкин // Изв. вузов. Авиационная техника. 1989. №2. С.85–86.

60. Егоров, А.Г. Горение дисперсного алюминия в потоке воздуха [Текст] / А.Г. Егоров // Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 305 с.

61. Алемасов В.Е. Термоанемометрические методы исследования отрывных течений [Текст] / В.Е. Алемасов, Г.А. Глебов, А.П. Козлов // Казань: Казанский филиал АН СССР, 1989. 178 с.

62. Алемасов В.Е. Турбулентные струйные течения в каналах [Текст] / В.Е. Алемасов, Г.А. Глебов, А.П. Козлов и др. // Казань: Казан.филиал АН СССР, 1988. 172 с.

63. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А. Лефевр // Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 204 с.

64. Талантов А.В. Горение в потоке [Текст] / А.В. Талантов // М.: Машиностроение, 1978. 160 с.

65. Раушенбах Б.В. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей [Текст] / Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.В. Беспалов, В.Я. Бородачев, М.С. Волынский, А.Г. Прудников // М.: Машиностроение. 1961. 521 с.

66. Зельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва [Текст] / З.Я Зельдович, Г.И. Баренблат, В.Б. Либрович и др. // М.: Наука, 1980.

67. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф // Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. 248 с.

68. Липанов А.М. Численный эксперимент в классической гидромеханике турбулентных потоков [Текст] / А.М. Липанов, Ю.Ф. Кисаров, И.Г. Ключников // Екатеринбург: Урал.отд-ние РАН, 2001. 161 с.

69. Кастро И.П. Трудности при численном расчете сложных турбулентных течений [Текст] / И.П. Кастро // Турбулентные сдвиговые течения. Ч. 1. М.: Машиностроение, 1982. С. 227–247.

70. Алемасов В.Е., Гафуров А.Р., Глебов Г.А. Козлов А.П. Экспериментально-теоретические исследования развития турбулентной струи химически реагирующего газа в канале [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Р. Гафуров, Г.А. Глебов, А.П. Козлов // Тепломассообмен при поверхностном горении. Мн.: ИТМО АН БССР, 1986. С. 122–130.

71. Гупта А. Закрученные потоки [Текст] / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред // Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 588 с.

72. Губарев Ю.Г., Луговцев Б.А. О спонтанной закрутке в осесимметричных течениях: Тез.докл. IVМеждународ. конф. // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике. - Новосибирск, 1995. - С. 69.

73. Генкин А.Л., Гнатюк Т.А., Ярин Л.П. // Физика аэродисперсных систем. - Киев-Одесса: Вицашк., 1982. - С. 97.

74. Князева А.Г. Особенности очагового теплового воспламенения при различных начальных распределениях температуры [Текст] / А.Г. Князева,

Р.С. Буркина, В.Н. Вилунов // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 3. С. 45–47.

75. Сеплярский Б.С. Анализ нестационарной картины воспламенения очага разогрева [Текст] / Б.С. Сеплярский, С.Ю. Афанасьев // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 6. С. 9–13.

76. Буркина Р.С. О возбуждении химической реакции в «горячей точке» [Текст] / Р.С. Буркина, В.Н. Вилунов // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 4. С. 75–79.

77. Буркина Р.С. Исследование очагового теплового воспламенения и режима его вырождения [Текст] / Р.С. Буркина, А.Г. Князева // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 3–8.

78. Губин Е.И. О зажигании пылевого облака искрой [Текст] / Е.И. Губин, И.Г. Дик // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 2. С. 10–17.

79. Сеплярский Б.С. Изучение искрового зажигания газовзвеси твердых частиц с помощью очаговой модели воспламенения [Текст] / Б.С. Сеплярский, Т.П. Ивлева // Химическая физика процессов горения и взрыва. XII Симпозиум по горению и взрыву. Черногоровка. 2000. Ч. II. С. 28–30.

80. Крайнов А.Ю. Критические условия воспламенения искрой смеси газообразных окислителя и горючего с реагирующими частицами [Текст] / А.Ю. Крайнова, В.А. Баймлер // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 3. С. 30–36.

81. Барзыкин В.В. Тепловые режимы экзотермических реакций [Текст] / В.В. Барзыкин // Черногоровка: ИСМАН, 2004. 312 с

82. Хайкин Б.И. О воспламенении частиц металла [Текст] / Б.И. Хайкин, В.Н. Блошенко, А.Г. Мержанов // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 4. С. 474.

83. Щетинков Е.С. Физика горения газов [Текст] / Е.С. Щетинков // М.: Наука, 1965. 740 с.

84. Таубкин И.С. Пожаро- и взрывобезопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки [Текст] / И.С. Таубкин, С.И. Таубкин // М.: Химия, 1976. 264 с.

85. Тизиллов А.С. Зажигание дисперсного алюминия в турбулентном потоке воздуха [Текст] / А.Г. Егоров, А.С. Тизиллов // Итоги науки: избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. Москва: Российская академия наук, 2013. С. 52–72.

86. Егоров А. Г. Воспламенение турбулентного потока аэрозвеси электрической искрой [Текст] / А.Г. Егоров, А.И. Сафронов, А.С. Тизиллов // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 2. С. 61–64.

87. Тизиллов А.С. Исследование теплового взрыва в потоке псевдожидкого топлива [Текст] / А.С. Тизиллов, А.Г. Егоров, А.И. Сафронов, С.В. Иванов // ВЕСТНИК СГАУ им. академика С.П. Королева. Самара, 2011. №5 (29). С. 88–93.

88. Тизиллов А.С. Очаговое зажигание промышленных порошков АСД-1 и АСД-4 в потоке воздуха [Текст] / А.С. Тизиллов, А.Г. Егоров // Дисперсные системы. XXIV научная конференция стран СНГ: материалы конференции. Украина, Одесса. 2010. С. 107–108.

89. Виленский Т.В. Динамика горения пылевидного топлива [Текст] / Т.В. Виленский, Д.М. Хзмалян // М.: Энергия, 1978. 248 с.

90. Бойко В.М. Воспламенение газовзвесей металлических порошков в отраженных УВ [Текст] / В.М. Бойко, В.В. Лотов, А.Н. Папырин // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 67–74.

91. Загрязкин Н.Н. Исследование скорости распространения пламени в турбулентном газовом потоке. Дис. канд. техн. Наук [Текст] / Н.Н. Загрязкин // М.: Ин-т хим. физики АН СССР, 1951.

92. Fridman R., Machek A. //9 -th Symposium (Int) on Combustion. New-York - London: Academic Press, 1963. - P. 703.

93. Шевчук В.Г. Нестационарное распространение пламени в газовзвеси частиц твердых горючих [Текст] / В.Г. Шевчук, Е.Н. Кондратьев, Л.В. Бойчук и др. // Физика аэродисперсных систем: Респ. межвед. науч. сб. Вып. 27. Киев-Одесса: Вищашк. 1985. С. 70–73.

94. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли [Текст] / А.Я. Корольченко // М.: Химия, 1986. 216 с.

95. Горбис З.Р. Тепломассообмен и гидродинамика сквозных потоков [Текст] / З.Р. Горбис // М.: Энергия. 1970. 423 с.

96. Тизиллов А.С. Определение границ зажигания аэровзвеси частиц алюминия в высокоскоростном потоке воздуха [Текст] / А.С. Тизиллов, А.Г. Егоров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. КОРОЛЁВА (национального исследовательского университета). Самара. 2015. Т. 14, № 2. С. 70–77.

97. Тизиллов А.С. О пределах распространения пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси [Текст] / А.С. Тизиллов, А.Г. Егоров // Сборник трудов. Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ. Самара. 2012. С. 181.

98. Тизиллов А.С. Исследование механизма стабилизации пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси [Текст] / А.С. Тизиллов, А.Г. Егоров // ВЕСТНИК СГАУ им. академика С.П. Королёва. Самара. 2013. №3 (41). Ч.1. С. 98–102.

99. Егоров А.Г. Время пребывания частиц алюминия в камерах сгорания с внезапным расширением [Текст] / А.Г. Егоров // Химическая физика. 2003. Т. 22, № 11. С. 54–63.

100. Егоров А.Г. Определение времени пребывания гетерогенного топлива в зоне обратных токов [Текст] / А.Г. Егоров, М.М. Русаков, А.П. Шайкин // Изв. вузов. Авиационная техника. Казань, 1999. № 2. С. 69–71.

101. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва [Текст] / Л.Н. Хитрин // М.: Изд-во МГУ, 1957. 442 с.

102. Егоров А. Г. Исследование характеристик течения в канале с внезапным расширением [Текст] / А.Г. Егоров, В.И. Зоткин, С.В. Иванин // Вестник Самарского государственного технического университета. 2008. № 3 (16). С. 85–94.

103. Тизилев А.С. О пределах стабилизации пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // ВЕСТНИК СГАУ им. академика С.П. Королёва. Самара, 2012. – №3 (34). Ч.1. С. 270–274.

104. Тизилев А.С. Определение границ устойчивого горения в высокоскоростном потоке аэрозвеси частиц алюминия [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // Ракетно-космические двигательные установки: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. Москва, октябрь 2013 г. М.: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2013. С. 47–49.

105. Агеев Н.Д. Скорость стационарного пламени в газовзвесьях алюминия [Текст] / Н.Д. Агеев, С.В. Горошин, А.Н. Золотко, Н.И. Полетаев, Ю.Л. Шошин // Горение гетерогенных и газовых систем: Материалы IX Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка, 1989. С. 83–85.

106. Лукачев В.П. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности [Текст] / В.П. Лукачев, А.М. Ланский, В.Ю. Абрашкин, А.А. Диденко и др. // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. Самара, 1998. Вып. 1. С. 11–38.

107. Parikh P.G. Resonant Entrainment of a Confines Pulsed Jet [Text] / P.G. Parikh, P.S. Moffat // American society of Mechanical Engineers Transactions of ASME. 1982. № 4. P. 482–488.

108. Егоров А.Г. Методы управления процессом горения дисперсного алюминия в потоке воздуха [Текст] / А.Г. Егоров, А.С. Тизилев // В сборнике: Механика и процессы управления. Труды XXXIX Уральского семинара. 2009 С.115–122.

109. Власов Е.В. Когерентные структуры в турбулентных струях и следах [Текст] / Е.В. Власов, А.С. Гиневский // Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. 1986. Т. 20. С. 3–84.
110. El-Banhawy Y. Premixed turbulent Combustion of a Sudden-expansions flow [Text] / Y. El-Banhawy, S. Sivasegaram, J.H. Whitelaw // Combustion and Flame. 1983. Т. 50, № 2. Р. 153–165.
111. Финягин А.П. Газификация и горение топлива [Текст] / А.П. Финягин // М.: АН СССР, 1959. С. 82–89.
112. Канторович Б.В. Гидродинамика и теория горения потока топлива [Текст] / Б.В. Канторович, В.И. Миткалинный, Г.Н. Делягин и др. // М.: Металлургия, 1971. 488 с.
113. Кривандин В.А. Металлургическая теплотехника [Текст] / В.А. Кривандин, В.В. Арутюнов, Б.С. Матрюков и др. // М.: Металлургия, 1986. 424 с.
114. Chigier N.A. [Text] /N.A.Chigier, J.M.Beer// Trans. ASME 86D. J. Basic Eng. № 4. Р. 788.
115. Тизилев А.С. Исследование влияния закрутки спутного высокоскоростного потока воздуха на геометрические параметры алюминиево-воздушного факела [Текст] /А.С.Тизилев, А.Г. Егоров, В.А. Архипов, В.Я. Ниязов, О.В. Матвиенко // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 10. С. 58–61.
116. Тизилев А.С., Влияние закрутки спутного потока воздуха на характеристики горения алюминиево-воздушного факела [Текст] /А.С.Тизилев // В сб.: Фундаментальные и прикладные проблемы науки. М.: РАН. 2013. Т. 2. С. 38–45.
117. Schadow K. Mixing characteristes of a ducfed, elliptical Jet with dump [Text] / K.Schadow, K. Wilson, D. Parr, E. Gutmark // AIAA Pap. 1986. № 1399. Р. 7.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт о внедрении результатов исследования

УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора по НИР
С.Н. Мансуров
2016



АКТ

о внедрении результатов

кандидатской диссертации Тизилова Андрея Сергеевича на тему: «Методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия», в работах, выполнявшихся Федеральным казенным предприятием «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем» (ФКП «ГкНИПАС»)

Комиссия в составе: зам. директора Мансурова С.Н., главного советника, доктора технических наук Ниязова В.Я., начальника научно-испытательного отделения Устинова С.В. составили настоящий акт о том, что результаты настоящей диссертационной работы:

- расчёт и конструкция камеры сгорания с внезапным расширением для энергетической установки;
- система управления и подачи дисперсного алюминия в камеру сгорания;
- система зажигания;
- экспериментальные данные по натурным испытаниям энергетической установки использованы в научно-исследовательских работах ФКП «ГкНИПАС».

Разработанная, на основе результатов исследований, изложенных в диссертационной работе, энергетическая установка и её испытания, показали, что при простоте и надёжности её конструкции она обеспечивает надёжное воспламенение и устойчивое горение в широком диапазоне изменения, как по скорости потока, так и составу аэровзвеси частиц алюминия.

Изменяя параметры на входе установки (дисперсность и расход порошкообразного алюминия, параметр закрутки потока воздуха), можно управлять формой, размерами и полнотой сгорания алюминиево-воздушного факела.

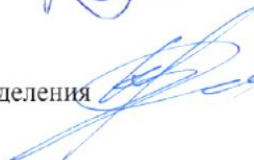
Эксплуатация энергетической установки в наземных условиях позволяет сократить дорогостоящий цикл лётных испытаний.

Главный советник,
доктор технических наук,
заслуженный деятель науки РФ



В.Я. Ниязов

Начальник научно-испытательного отделения



С.В. Устинов



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования

**«Тольяттинский государственный
университет»
(ТГУ)**

ОКПО 55914968 ул. Белорусская, 14, г. Тольятти,
ОГРН Самарской обл., 445020
1036300997567 Телефон (8482) 54-64-24
ИНН Факс (8482) 53-95-22
6320013673 E-mail: office@tltsu.ru
КПП 632401001 <http://www.tltsu.ru>

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель ректора по развитию
учебного процесса

 Ярыгин А.Н.
«» апреля 2016 г.



№ _____
на № _____ от _____

АКТ

Внедрения в учебный процесс кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью» результатов диссертации Тизилова А.С. на тему «Методы и средства управления процессами горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия»

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе председателя заведующего кафедрой «Управление промышленной и экологической безопасностью» д.п.н., профессора Гориной Л.Н. и членов: к.т.н., доцента Рашоян И.И., д.т.н., профессора Егорова А.Г. удостоверяем, что результаты диссертационного исследования Тизилова А.С., а именно экспериментальные данные по воспламенению аэрозвесей частиц алюминия внедрены в учебный процесс кафедры при разработке курса лекций по дисциплине «Теория горения и взрыва» для студентов, обучающихся по профилю 280705.62 «Пожарная безопасность».

Председатель:

Заведующий кафедрой
д.п.н., профессор

Члены комиссии:

к.т.н., доцент

д.т.н. профессор



Л.Н. Горина



И.И. Рашоян



А.Г. Егоров



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования

**«Тольяттинский государственный
университет»
(ТГУ)**

ОКПО 55914968 ул. Белорусская, 14, г. Тольятти,
ОГРН Самарской обл., 445020
1036300997567 Телефон (8482) 54-64-24
ИНН Факс (8482) 53-95-22
6320013673 E-mail: office@tltsu.ru
КПП 632401001 <http://www.tltsu.ru>

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель ректора по развитию
учебного процесса


Ярыгин А.Н.
« 04 » апреля 2016 г.


№ _____
на № _____ от _____

АКТ

внедрения в учебный процесс кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика» результатов диссертации Тизилова А.С. на тему
«Методы и средства управления процессами горения
в потоке аэрозвеси частиц алюминия»

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе председателя заведующего кафедрой «Нанотехнологии, материаловедение и механика» к.т.н., доцента Прасолова С.Г. и членов: д.ф-м.н., профессора Сафронова А.И., к.т.н., доцента Будаева С.И. удостоверяем, что результаты диссертационного исследования Тизилова А.С., а именно данные по организации рабочего процесса в камере сгорания установки газодисперсного синтеза внедрены в учебный процесс кафедры, при разработке курса лекций по дисциплине «Методы и технологии получения наноматериалов» для студентов, обучающихся по профилю 150100.62 «Материаловедение и технологии наноматериалов и наносистем».

Председатель:

Заведующий кафедрой
к.т.н., доцент



С.Г. Прасолов

Члены комиссии:

д.ф-м.н. профессор



А.И. Сафронов

к.т.н., доцент



С.И. Будаев