

На правах рукописи

Кулешов Павел Сергеевич

**РЕЗОНАНСНАЯ ДИСПЕРГАЦИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ
В ПАРОГАЗОВЫХ СРЕДАХ С ХИМИЧЕСКИМ
РЕАГИРОВАНИЕМ**

Специальность 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2020

Работа выполнена по месту работы соискателя: в Федеральном государственном унитарном предприятии Центральном институте авиационного моторостроения имени П.И. Баранова.

Научный руководитель: Кузнецов Михаил Михайлович
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор
Московского государственного областного университета

Официальные оппоненты: Гладков Сергей Октябрьнович
доктор физико-математических наук профессор,
профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
“Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)”

Зиборов Вадим Серафимович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории ударно-волновых воздействий
Федерального государственного учреждения науки
Объединенного института высоких температур РАН

Ведущая организация: Государственный научный центр
Федеральное государственное унитарное предприятие
“Центральный аэрогидродинамический институт
имени профессора Н.Е. Жуковского”

Защита диссертации состоится «11» декабря 2020г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.14 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете)” по адресу: 125993, М. А-80. ГСП-3, Волоколамское ш., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Московского авиационного института (национального исследовательского университета)” или на сайте https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=114519

Автореферат разослан “___” _____ 2020г.
Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.14,
кандидат физико-математических наук

Тираж 80 экземпляров



Гидасов В.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящей работе изложены результаты исследований явления диспергации пленки водного конденсата в электрическом поле и окислированных наночастиц алюминия при быстром нагреве, объединенные общим подходом, в основе которого лежат волновые и резонансные процессы в жидкостях. В первом случае диспергация пленки приводила к возникновению нового режима гетерогенной конденсации в парогазовой струе на микрокаплях воды, а во втором – к образованию паров алюминия при испарении кластеров алюминия и ускоренному воспламенению топливной смеси. В первом случае исследования выполнялись экспериментально, а во втором – вычислительными методами физико-химической кинетики.

Актуальность проблемы

В разных технических приложениях с применением аэрозоля стремятся к его более мелкому и монодисперсному распылению вплоть до субмикронного размера (подача жидкого топлива через форсунки, струйная печать, аэрография, визуализация газовых потоков и т.д. [1-4]). Это позволяет повышать полноту сгорания топлива, равномерней и экономней напылять краску, повышать точность оптической диагностики аэрозольных течений.

Промышленные генераторы аэрозоля по принципу действия делятся на диспергирующие и конденсационные [3]. Первый вид конструктивно проще второго, но в нем создается более крупный аэрозоль и меньше возможностей по управлению его характеристиками. Для генераторов второго вида характерно образование пленки конденсата на холодных конструктивных элементах. Пленка, хаотично срываясь с их кромок и дробясь, искажает своими крупными фрагментами распределение по размерам мелкодисперсного аэрозоля, получаемого при объемной конденсации. Поэтому важно научиться контролировать дробление пленки конденсата. Формируя в электрическом поле резонаторы на выступах пленки около кромок элементов конструкции можно получить мелкий монодисперсный аэрозоль вместо крупных фрагментов в дополнение к основной его фракции, сконденсировавшейся в объеме парогазовой струи (или вместо нее).

Аэрозоль (в том числе и заряженный) может образовываться спонтанно в спутном следе самолета, в реактивной струе продуктов горения, тем самым, влияя на экологию атмосферы. Например, актуальна проблема образования водных ассоциатов серной кислоты контрейла [5]. В то же время, аэрозоль в спутном следе может помочь в задаче визуализации последнего вблизи аэропорта для повышения безопасности полетов, т.к. аэрозоль определенного размера хорошо рассеивает электромагнитные (ЭМ) волны радаров/лидаров и т.д. [6]. В контрейле, кроме гомогенной конденсации, необходимо учитывать и

гетерогенную на ионах. Так, при электризации набегающим потоком планера летательного аппарата (ЛА) в спутную струю попадают ионы коронного разряда со специально организованных разрядников. Поэтому важно изучать конденсацию в парогазовых потоках под действием коронного разряда. Так как этим вопросом много лет плодотворно занималась научная группа А.Б. Ватажина (ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова), то собственные результаты экспериментов сравниваются с результатами этой научной группы [7, 8].

Актуальность изучения диспергации оксидированных наночастиц металлов и металлоидов при быстром нагреве в ударной волне в химически реагирующих средах вытекает из важности для проектирования воздушно-реактивных двигателей ракет и летательных аппаратов задачи повышения энергетических характеристик топлива, и полноты его сгорания [9]. Из экспериментов известно о влиянии размеров частиц алюминия на их воспламенение и окисление в воздухе. Однако, производство и хранение частиц Al размером 1-10 нм (самых мелких из полученных в экспериментах) создает значительные сложности: в нормальных условиях они покрываются оксидным слоем, доля которого, из-за большого относительного вклада их поверхности, по массе сопоставима с не окисленным веществом. Это снижает энергетическую эффективность таких топлив, а их производство оказывается дорогостоящим. Освоено менее затратное производство порошков крупных частиц Al 0.01-1 мкм с небольшой по массе долей оксидного слоя ~5%. Однако, эти частицы воспламеняются медленней и при высоких скоростях потока в тракте воздушно-реактивных двигателей не успевают полностью сгореть. Диспергация крупных наночастиц на мелкие неокисленные кластеры в ударной волне позволяет снять эти проблемы.

В известных работах по диспергации оксидированных Al наночастиц [10-13] отсутствуют формулы, связывающие размеры исходных наночастиц и образующихся кластеров (n-Al), отсутствуют расчеты о влиянии размеров наночастиц на их время воспламенения. В гидроалюминиевой энергетике представляет интерес малоизученный вопрос воспламенения n-Al в атмосфере паров H_2O/CO_2 – о влиянии их соотношения на задержку воспламенения.

Цели диссертационной работы

Была поставлена цель - исследовать явление диспергации и ее следствий, как для пленки водного конденсата в электрическом поле, так и для оксидированных наночастиц алюминия при их быстром нагреве. При этом необходимо было решить частные задачи: создать экспериментальные установки по наблюдению дробления пленки водного конденсата и конденсации парогазовой струи в электрическом поле; изучить свойства водного аэрозоля при конкуренции разных видов конденсации парогазовой струи в коронном разряде; теоретически изучить свойства распределений по

размерам алюминиевых наночастиц и кластеров, численно исследовать время воспламенения последних в разных атмосферах.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

- 1) Экспериментально обнаружен новый вид электростимулированной гетерогенной конденсации в парогазовой струе на микрокаплях, которые являются продуктами дробления пленки конденсата в капилляре под действием электрического поля;
- 2) Предложен оригинальный механизм резонансно-капиллярного дробления жидкой пленки конденсата с образованием узкодисперсных микрокапель, выведены формулы их средних размеров и дисперсии;
- 3) Экспериментально изучено явление усиления коронного разряда при увеличении влагосодержания в воздухе и, наоборот, увеличения интенсивности испарения воды при воздействии на нее коронного разряда;
- 4) Экспериментально уточнены границы преобладания по температуре и по величине электростатического поля совместно протекающих режимов конденсации, как гомогенной, так и электростимулированной гетерогенной, развивающейся на ионах коронного разряда и на фрагментах дробления пленки;
- 5) Предложено и объяснено максвелловское распределение размеров оксидированных наночастиц металлов и металлоидов, получаемых, согласно публикациям, плазменной переконденсацией прекурсора в дуговом разряде в отсутствие коагуляции;
- 6) Предложен оригинальный механизм резонансной диспергации оксидированных наночастиц металлов и металлоидов быстрым нагревом в ударной волне. В рамках предложенного механизма получены зависимости наиболее вероятных размеров вторичных кластеров от размеров исходных наночастиц, указан способ нахождения распределения кластеров по размерам в зависимости от исходного распределения наночастиц;
- 7) Разработан оригинальный детальный кинетический механизм (в соавторстве с Н.С. Титовой, А.М. Стариком, А.С. Шариповым и А.М. Савельевым) воспламенения кластеров Al с учетом их предварительного испарения в различных окислительных атмосферах (O_2 , H_2O , CO_2).

Теоретическая и практическая значимость. Полученные данные по конденсации парогазовой струи в коронном разряде могут найти применение при разработке генераторов аэрозоля для бесконтактной диагностики газовых потоков, в области струйной печати и при разработке 3D-принтеров. Предложенный способ получения аэрозоля конденсацией парогазовой струи на фрагментах дробления жидкой пленки в электрическом поле является перспективным с точки зрения возможности управления средним размером и

дисперсностью заряженного аэрозоля с помощью электрического поля. Результаты экспериментов по электростимулированной конденсации были опубликованы в работах автора [A1-A8] и использовались в проекте ИНТАС №1817-01 “Экспериментальное и теоретическое исследование ионно-молекулярных кластеров в дозвуковом турбулентном потоке” (координатор В.В. Вышинский, ЦАГИ) в рамках изучения возможностей визуализации лидаром вихревого спутного следа за тяжелым самолетом при его посадке с целью оценки безопасности садящегося следом легкого самолета.

Исследованный метод резонансной диспергации быстрым нагревом в ударной волне окисированных наночастиц металлов и металлоидов перспективен для применения в тракте воздушно-реактивного двигателя с целью уменьшения времени воспламенения наночастиц. Метод способствует сокращению массо-габаритных характеристик двигателя и повышению полноты сгорания топлива. Предложенный механизм диспергации наночастиц Al использовался вместе с кинетическим механизмом окисления Al, как научный инструментальный, в расчетах физико-химической кинетики по грантам РФФИ: №18-08-00476_а, 17-01-00810_а, 16-29-01098-офи_м. На основе данных расчетов, изложенных в [A9-A16], получен патент RU2701249 (в соавторстве с А.М. Савельевым) “Способ диспергирования трудновоспламеняемых наночастиц бора”, который может быть востребован при разработке воздушно-реактивных двигателей для летательных аппаратов и ракет.

Положения, выносимые на защиту:

- Результаты экспериментального исследования диспергации пленки водного конденсата в электрическом поле коронного разряда, зависимости средних размеров фрагментов дробления и их дисперсии от величины электрического поля и температуры окружающей среды;
- Разработанный оригинальный механизм диспергации на основе явления резонанса капиллярных колебаний жидкости, пригодный как для описания дробления водяной пленки конденсата, так и для описания дробления жидкой сферической наночастицы алюминия при ударном воздействии, позволяющий предсказывать средний размер и дисперсию фрагментов дробления.
- Результаты экспериментального исследования вольтамперных характеристик коронного разряда в водяном паре в зависимости от его влагосодержания, скорости испарения воды под действием коронного разряда;
- Результаты экспериментального исследования границ существования разных видов конденсации парогазовой струи (гомогенная, гетерогенная на ионах/фрагментах дробления пленки) под действием коронного разряда в зависимости от величин электрического поля и внешней температуры;
- Предложен метод нахождения распределения кластеров по размерам (фрагментов диспергации) по заданному исходному распределению окисированных наночастиц металлов и металлоидов. В качестве примера

изучено распределение кластеров на основе максвелловского распределения наночастиц алюминия.

- Разработана оригинальная детальная модель окисления кластеров алюминия с учетом их испарения в окислительных атмосферах O_2 , H_2O , CO_2 (в соавторстве с Н.С. Титовой, А.М. Стариком, А.С. Шариповым и А.М. Савельевым).
- На основе численного моделирования показано, что уменьшение в несколько раз исходных размеров окисированных наночастиц алюминия уменьшает на порядки время их воспламенения в атмосферах O_2 , H_2O , CO_2 при организации процесса диспергации быстрым нагревом в ударной волне.
- На основе численного моделирования показано, что при исходном максвелловском распределении наночастиц по размерам распределение вторичных кластеров становится более узким в силу резонансного характера диспергации, возможен упрощенный расчет времени воспламенения по среднемассовым размерам без существенной потери точности.

Достоверность положений и выводов диссертации подтверждена соответствием собственных и опубликованных экспериментальных измерений, теоретических оценок и численных расчетов для характеристик пленки конденсата, коронного разряда, водного аэрозоля, размеров фрагментов диспергации наночастиц Al, их времени воспламенения.

Апробация. Результаты диссертационной работы докладывались на:

- (XLIV, XLV, XLVI, XLVII, XLVIII, №61, №62) научных конференциях МФТИ (2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2018, 2019 гг.), г. Долгопрудный, Жуковский
- XIV школе-семинаре “Аэродинамика летательных аппаратов”, ЦАГИ, 2003г., г. Жуковский
- VII и VIII междунар. научных конференциях “Оптические методы исследования потоков”, (2003, 2005 гг.), г. Москва
- V междунар. конференции по неравновесным процессам в соплах и струях, 2004 г., г. Самара
- 9th International seminar on flame structure 9 ISFS, междунар. научная конференция, 2017г, г. Новосибирск
- Научной конференции по горению и взрыву Института Химической Физики РАН, 6-8 февраля 2019 г., Москва, Россия
- XI Международной научно-технической конференции “Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей”, 2019 г, г. Самара

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация посвящена расчетно-экспериментальным исследованиям физико-химических процессов в потоках реагирующего газа и плазмы: диспергации и

воспламенению наночастиц при быстром нагреве за ударными волнами; диспергации пленки конденсата при дозвуковом течении пара в капилляре и объемной конденсации в затопленной турбулентной парогазовой струе в присутствии коронного разряда. Результаты отвечают паспорту специальности 01.02.05 “Механика жидкости газа и плазмы” в п. 1, 3, 6, 8, 13, 14, 16.

Публикации и личный вклад автора. Материалы диссертации полностью изложены и опубликованы в 16 работах, в том числе в 3-х статьях [A7, A8, A14] в рекомендованных ВАК журналах и 2-ух статьях [A9, A10] в иностранных журналах, индексируемых в базах SCOPUS и Web of Science, а также в 1-ом патенте РФ [A15].

Во всех работах соискатель участвовал в постановке задач. Механизм диспергации, как пленки конденсата, так и ядра наночастицы, разработан лично соискателем. Кинетический механизм окисления алюминия был разработан совместно с Н.С. Титовой, А.М. Стариком, А.С. Шариповым и А.М. Савельевым. Расчеты по кинетике воспламенения алюминия выполнялись автором в коммерческом пакете программ CHEMKIN. Эксперименты по изучению электростимулированной конденсации проводились совместно с Ю.В. Маношкиным. Автор принимал непосредственное участие при анализе результатов, формулировании выводов, и подготовке научных публикаций [A1-A16].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав и заключения. Диссертация изложена на 148 стр., содержит 46 рисунков и таблиц, 106 источников литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели диссертации, описаны физические явления, связанные с поставленными задачами, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **обзоре литературы по теме диссертации** содержится анализ ранее опубликованной и современной научной литературы об основных направлениях и достижениях в следующих областях знаний, связанных с темой диссертации: образование и дробление жидких пленок, коронный разряд, электростимулированная конденсация двухфазных струй, диспергация и воспламенение окисдированных наночастиц Al в ударных волнах.

Глава 1 описывает поведение пленки конденсата под воздействием парогазового потока и электрического поля в различных внешних условиях и написана на основе работ соискателя [A7, A8].

Была разработана и изготовлена экспериментальная установка для создания пересыщенного парогазового потока, наблюдения образования и диспергации пленки конденсата в капилляре под действием сильного электростатического поля (рис.1) с возможностью изменения расположения, геометрии и теплового режима сопел. На установке при стандартном режиме работы достигнуты: скорость потока водяного пара в капиллярном цилиндрическом сопле $\sim 100\text{ м/с}$, начальная температура парогазовой струи $370\text{--}390\text{ К}$ при температуре окружающей среды $290\text{--}303\text{ К}$, массовый расход пара $\sim 4.5 \cdot 10^{-5}\text{ кг/с}$. От этих параметров зависят режимы течения пленки конденсата и ее диспергации. С помощью цифрового микроскопа на внутренней поверхности горизонтального капилляра обнаружена водная пленка толщиной около среза сопла $d_2 = 20\text{ мкм}$, скорость движения жидкости в ней $\sim 3\text{ мм/с}$, пленочный расход $\sim 2 \cdot 10^{-7}\text{ кг/с}$.

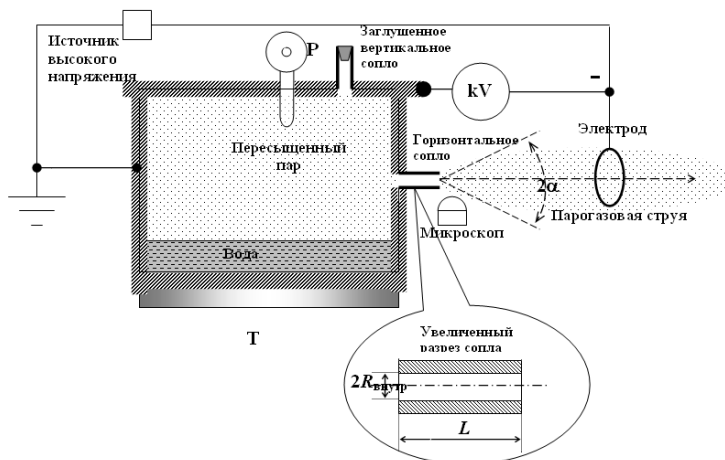


Рис.1
Схема генератора
аэрозоля,
Р – манометр,
Т – нагреватель.

В § 1.2 приводятся результаты экспериментов по диспергации пленки на микрокапли под воздействием парогазового потока и электрического поля в различных внешних условиях. Рассматривалось воздействие на пленку, образованную в горизонтальном сопле, кольцевого не коронирующего электрода. Такой электрод позволял создавать осесимметричное электрическое поле вблизи капилляра в отсутствие ионов коронного разряда. Под действием напряженности E электрического поля возникает утолщение пленки и возрастает сила его взаимодействия с парогазовым потоком. Из-за этого область утолщения разваливается на разнокалиберный аэрозоль. Частота прерывистой конденсации оказалась пропорциональна потенциалу ϕ не коронирующего электрода. При постоянной величине E частота нестационарной конденсации была пропорциональна температуре окружающей среды. Дальнейшее увеличение E , ϕ при $T = \text{const}$ приводит к

возникновению монотонной конденсации с образованием стационарного водяного выступа на срезе сопла и монодисперсного аэрозоля в дальней зоне струи, где пар становится ненасыщенным. Стационарность формы выступа объясняется его диспергацией в режиме постоянного натекания пленки.

При $\varphi=0-9$ кВ конденсации в струе не наблюдалось. При $\varphi=10$ кВ на сопле возникал устойчивый водяной выступ, а вблизи сопла возрастало обратное рассеяние лазерного излучения, что говорило о появлении зародышей конденсации с размерами гораздо меньше длины волны лазера. В этом случае в дальней зоне струи прямое рассеяние давало дифракцию на экране в виде 2-ух колец, по радиусам которых определялся размер монодисперсного аэрозоля $\sim 1-2$ мкм. При $\varphi=15$ кВ возникала вторичная корона на водяном выступе.

В § 1.3 приводится физико-математическая модель течения жидкой пленки конденсата из [14] (стр.137-145). Выводятся формулы толщины и скорости пленки, даются оценки их значений, оценки расхода воды в пленке, а также ее устойчивости к внешним воздействиям. Толщина пленки на срезе сопла d_t (рис.2) оценивалась формуле: $d_t \sim (K\nu L/\nu)^{1/2} \sim 10$ мкм, где L – длина охлаждаемой части сопла, ν – кинематическая вязкость воды, ν – интегральная по сечению скорость в сопле, K – безразмерный температурный параметр. Результаты расчетов и экспериментов оказались сопоставимы.

В § 1.4 предложен резонансный механизм диспергации пленки водного конденсата на срезе горизонтального сопла под действием парогазового потока и электрического поля. По наблюдениям при возникновении $E_{\text{внеш.}} \sim 5 \cdot 10^4$ В/м капля воды радиуса ~ 1 мм, натекающая на конец горизонтального капилляра, быстро трансформировалась в выступ на срезе сопла длиной ~ 50 мкм, вытянутый к электроду (рис.2). Предлагается следующий механизм явления: капля поляризуется при наложении поля и из-за электростатического взаимодействия вытягивается вдоль вектора E , попадает в область парогазовой струи, теряет гидродинамическую устойчивость, начинает дробиться и уменьшается в объеме, пока не станет устойчивым водяным выступом. Из-за обтекания выступа парогазовым потоком на его поверхности возникают капиллярные возмущения (рис.2). Сужающийся выступ является резонатором, его форма зависит от скорости натекания пленки и парогазового потока в сопле, от электрического поля. Капиллярные волны в резонаторе усиливаются лишь в узком диапазоне частот, который определяется локальной областью интерференции $D < \lambda^2/(2\Delta\lambda)$, формируемой полем на кончике выступа (рис.2).

Из-за усиления стоячих волн на кончике выступа с их пиков срываются микрокапли, которые сами колеблются с частотой $\omega_{\min}^2 = 8\sigma_s / (\rho \cdot R_{k0}^3)$ равной частоте капиллярных волн пленки $\omega^2 = 8\pi^3 \sigma_s / (\rho \lambda^3)$ [15], т.е. $\lambda = \pi R_{k0}$, где σ_s и ρ – коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкости, λ – длина капиллярной волны, R_{k0} – радиус микрокапли.

В случае не коронирующего электрода с ф, недостаточном для развития вторичной короны, в струе отсутствуют ионы (дополнительные зародыши капель), т.е. численный поток капель через сечение струи примерно постоянен. По экспериментальным значениям расхода пара в струе и воды в пленке, при постоянном количестве капель в потоке в рамках предложенного механизма диспергации получены следующие результаты: начальный радиус микрокапли - $R_{к0}=0.16$ мкм, длина капиллярной волны $\lambda \sim 0.5$ мкм, частота $\omega \sim 4.5 \cdot 10^8$ с⁻¹, диаметр области диспергации $D < 12$ мкм, скорость образования микрокапель - $dN/dt \sim 10^9 \div 10^{10}$ с⁻¹, ширина спектра резонирующих волн - $\Delta\lambda < 0.012$ мкм, разброс микрокапель по размерам - $\Delta R_{к0}/R_{к0} = \Delta\lambda/\lambda < 4\%$.

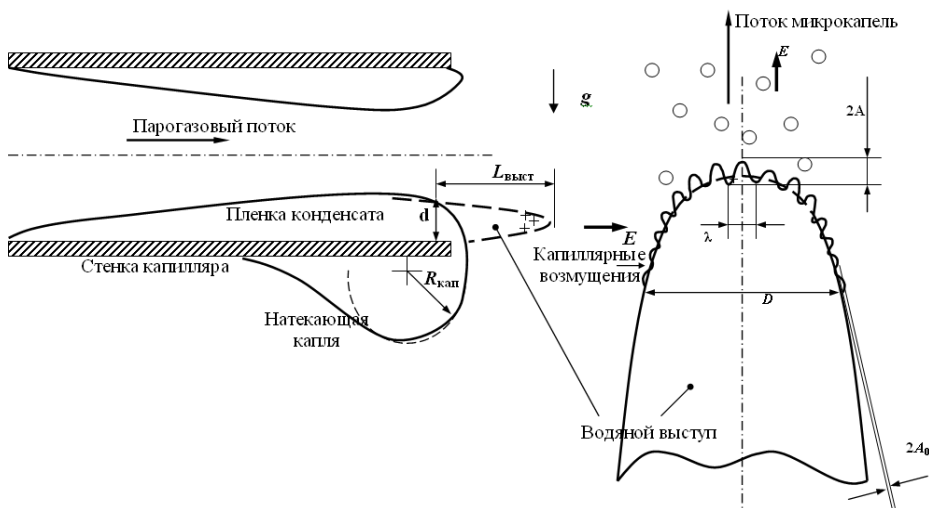


Рис.2 Диспергация пленки конденсата

Выводы к 1 главе: (при $p=1.4$ атм, $R_n=0.5$ мм, $L=20$ мм, $T_\infty=18^\circ\text{C}$)

1. При наличии около горизонтального сопла поля $0 \leq E < 10^4$ В/м, в капилляре преобладает кольцевой режим двухфазного течения;
2. При наличии около горизонтального сопла поля $10^4 \leq E < 5 \cdot 10^4$ В/м, преобладает снарядный режим двухфазного течения в капилляре и прерывистое дробление пленки конденсата на разнокалиберные фрагменты;
3. При наличии около горизонтального сопла поля $E \geq 5 \cdot 10^4$ В/м, в капилляре преобладает кольцевой режим двухфазного течения, возникает вторичная корона на стационарном выступе пленки на срезе сопла.
4. Стационарность выступа на временах ~ 0.1 с при непрерывном натекании пленки объясняется его монотонной диспергацией. Получены оценки фрагментов дробления: средний радиус и его дисперсия, скорость образования;

5. Изменение ориентации капилляра с горизонтальной на вертикальную не меняет характер процессов, но приводит к увеличению напряженности поля E , необходимого для перехода в снарядный режим, в ~ 1.5 раза.

Глава 2 описывает взаимодействие коронного разряда с водяным паром.

§ 2.1 посвящен описанию экспериментальной установки по изучению взаимодействия коронного разряда с неподвижной парогазовой средой (рис.3).

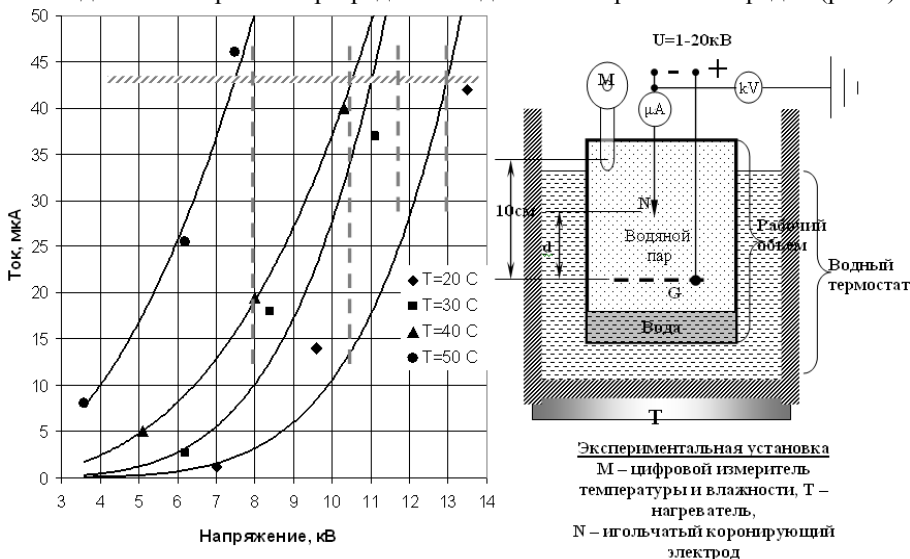


Рис.3 ВАХ коронного разряда в насыщенном водяном паре при различных температурах (межэлектродное расстояние $d=1$ см)

§ 2.2 посвящен обзору основных свойств коронного разряда. Для сферической геометрии электродов (радиус игольчатого коронирующего электрода R_0 удовлетворяет требованию $R_0 \ll d$, где d – межэлектродный промежуток) вольтамперная характеристика (ВАХ) коронного разряда аппроксимируется уравнением: $I \approx B \cdot (\varphi - \varphi_0) \cdot \varphi \cdot R_0 / d^2$, где коэффициент B – описывает электрические свойства среды в межэлектродном пространстве, φ_0 – потенциал зажигания коронного разряда, I – ток коронного разряда.

§ 2.3 содержит информацию о влиянии электропроводности среды в межэлектродном промежутке на ВАХ коронного разряда (рис.3) в зависимости от температуры неподвижного насыщенного водяного пара в межэлектродном промежутке. Было обнаружено, что при $\varphi = Const$ ток иглы нелинейно увеличивался с увеличением температуры. Действительно, молекулы воды при нагреве диссоциируют на катионы и анионы, возрастает как удельная проводимость δ дистиллированной воды, так и концентрация насыщенного

водяного пара n . В таблице №1 представлены справочные данные о температурной зависимости произведения $n \cdot \delta$ в виде их отношений для разных температур и результаты эксперимента в виде отношения токов I . Справочные и экспериментальные данные при $\varphi = Const$ хорошо совпадают для температур T_1 и T_2 в диапазоне 20 - 50°C, т.е. имеет место простая эмпирическая зависимость $B \sim n \cdot \delta$. Однако, для объяснения зависимости отношения токов I_{T_1}/I_{T_2} от напряжения $U = \varphi - \varphi_0$ при $T = const$ следует учесть, что одновременное увеличение температур T_1 и T_2 на величину $\Delta T \sim 4^\circ\text{C}$ оказывает примерно такое же воздействие на отношение $n\delta(T_1)/n\delta(T_2)$, как и увеличение потенциала $\Delta\varphi \sim 1\text{кВ}$ на I_{T_1}/I_{T_2} :

$$B(T, U) \sim n(T + qR_0(\varphi - \varphi_0)/(kd)) \cdot \delta(T + qR_0(\varphi - \varphi_0)/(kd)) \quad (1).$$

Для согласования (1) с таблицей №1 потенциал зажигания короны должен быть равен $\varphi_0 \sim 6\text{кВ}$.

Таблица 1. Зависимость отношения токов $I(T_1)/I(T_2)$ и $n\delta(T_1)/n\delta(T_2)$ при температурах T_1, T_2 насыщенного водяного пара и напряжении разряда U .

$U, \text{кВ} \Rightarrow$	6	7	8	9	10	11	12	$n\delta(T_1)/n\delta(T_2)$	$U=0$
$I(50^\circ\text{C})/I(20^\circ\text{C})$	20	18.3	15	проб.				$n\delta(50^\circ\text{C})/n\delta(20^\circ\text{C})$	18.7
$I(40^\circ\text{C})/I(20^\circ\text{C})$	8	6.7	6.3	4.5	3.4	проб.		$n\delta(40^\circ\text{C})/n\delta(20^\circ\text{C})$	7.9
$I(30^\circ\text{C})/I(20^\circ\text{C})$	2.9	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	пробой	$n\delta(30^\circ\text{C})/n\delta(20^\circ\text{C})$	2.9

§ 2.4 содержит информацию о влиянии коронного разряда на интенсивность испарения воды. В нормальных условиях ($T=20^\circ\text{C}$, $P=1\text{атм}$) при вертикальном расположении работающего источника отрицательного коронного разряда над кюветой с водой наблюдалось более быстрое (в 4 раза) испарение воды. Учитывались три процесса влияющих на его интенсивность: 1) вырывание молекул/кластеров воды с ее поверхности; 2) унос молекул пара из области непосредственно граничащей с поверхностью воды; 3) рост температуры насыщенных приповерхностных паров воды. Электрическое поле усиливает первый процесс, а электрический ветер коронного разряда - второй процесс, термическое действие разряда - третий.

Выводы ко 2 главе:

1. Выход ионов коронного разряда (интенсивность образования заряженных центров гетерогенной конденсации) повышается при увеличении потенциала катода, при уменьшении его радиуса и при увеличении влажности струи.
2. Совместно протекающие коронный разряд и процесс испарения воды взаимно усиливают друг друга (ток разряда и интенсивность испарения возрастают в несколько раз).

3. Экспериментально показано, что ток коронного разряда пропорционален концентрации насыщенных водяных паров и удельной проводимости воды, причем он нелинейно растет с возрастанием температуры.

Глава 3 описывает виды электростимулированной конденсации.

§ 3.1 посвящен обзору теоретических аспектов образования аэрозоля в результате гетерогенной конденсации на микрокаплях и ионах в зависимости от насыщения пара и интенсивности коронного разряда. Показано, что в дальней зоне струи при наличии сильного электростатического поля крупные капли радиуса $\sim 1\text{мкм}$ образуются на микрокаплях радиуса $\sim 0.16\text{мкм}$ сорванных с сопла в результате дробления пленки конденсата, а нанокapли радиуса $\sim 3\text{нм}$ образуются на ионах коронного разряда. Из ограничений устойчивости заряженной капли рассчитывается максимальный заряд: для капли радиуса $\sim 3\text{нм}$ он равен $1e$; для $R_0 \sim 0.16\text{мкм} - 70e$; для $R \sim 1\text{мкм} - 2700e$.

§ 3.2 посвящен свойствам затопленной парогазовой струи. Приведены расчеты величины коэффициента пересыщения в ней вдоль оси симметрии.

§ 3.3 описывает взаимодействие парогазовой струи и коронного разряда. По данным эксперимента ток на сетчатом электроде уменьшался из-за выноса сквозь сетку крупных $\sim 1\text{мкм}$ заряженных капель аэрозоля (рис.4). Исходя из этого предположения и с учетом температурных поправок (1), по известному расходу пара в струе определялось количество капель в потоке и их действительный заряд: для капли $R_0 \sim 0.16\text{мкм} - 10e$, для $R \sim 1\text{мкм} - 600e$, т.е. их заряды не достигают максимального значения.

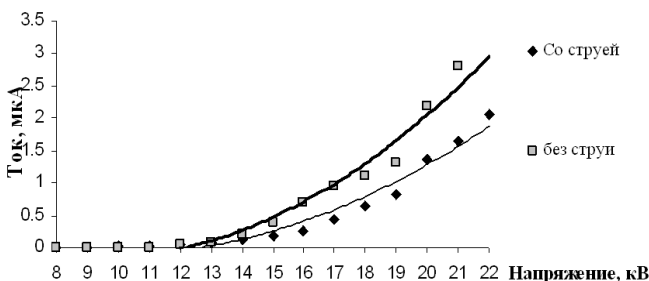


Рис.4
ВАХ коронного разряда ($d=7\text{ см}$ - расстояние между отрицательным игольчатым электродом и заземленным соплом)

Оценка длины свободного пробега легких ионов (без учета их прилипания) показала, что, ионы, находясь в зоне пересыщения струи, многократно взаимодействуют с молекулами воды, а, значит, в зоне пересыщения на легких ионах формируются устойчивые нанокapли с зарядом $1e$ с характерным размером несколько нанометров (гетерогенная конденсация на ионах). При коронном разряде возникает большое количество таких нанокapель, что уменьшает темпы роста фракции крупных капель и существенно снижает их размеры (примерно в 2р.). Последнее наблюдалось экспериментально (рис.5).

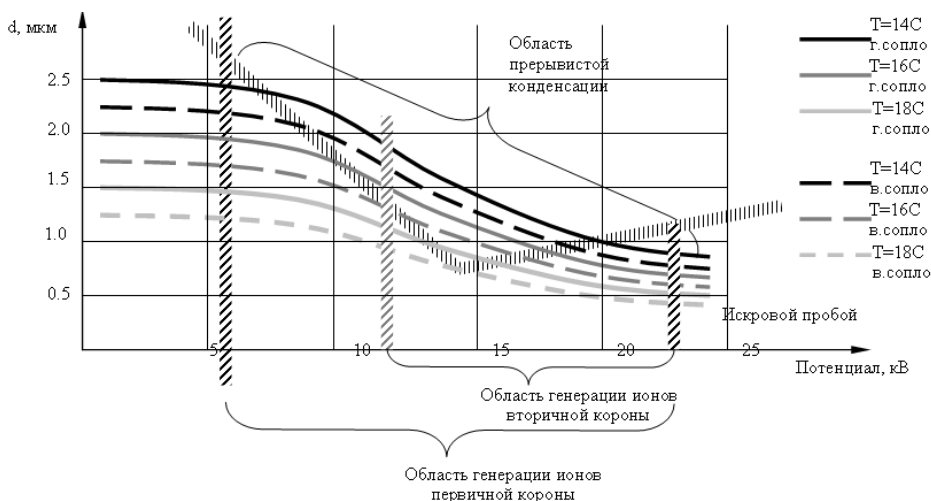


Рис.5 Диаметры $d=2R$ крупных капель аэрозоля в дальней зоне парогазовой струи в зависимости от потенциала коронирующего электрода при различных T воздуха (расстояние от электрода до сопла - 1 см, давление в сосуде $p=1.4$ атм)

§ 3.4 содержит информацию о классификации типов конденсации (электростимулированная гетерогенная на ионах/микрокаплях, естественная гомогенная, монотонная/прерывистая), с указанием их границ по температуре и величине электростатического поля по данным экспериментов (рис.5, 6).

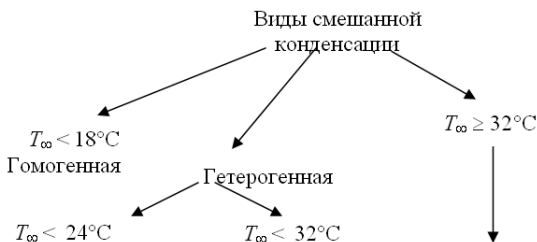


Рис.6 Виды смешанной конденсации в стандартном режиме работы генератора при $p = 1.4$ атм.

Конденсация на ионах первичной короны на электроде при $\varphi_0 > 7$ кВ	Прерывистая периодическая конденсация на микрокаплях около сопла при $10^4 \leq E < 5 \times 10^4$ В/м
Конденсация на ионах вторичной короны около сопла при $E \geq 5 \times 10^4$ В/м	Сильная монотонная конденсация на микрокаплях около сопла при $E \geq 5 \times 10^4$ В/м

В § 3.5 приводится физико-математическая модель для турбулентных струйных течений с конденсацией [7]. Показано, что использованная в [7] модель учитывает все типы конденсации, кроме той, что связана с диспергацией пленки конденсата. Однако, в некоторых случаях малые отличия

внешних условий между экспериментами диссертанта и [7] приводили к непропорционально большим отличиям в размерах аэрозоля: размер капель крупной фракции на расстоянии $150R_{\text{внутр}}$ от среза сопла оказался $\sim$ в 2 раза меньше, чем в [7], что объясняется увеличением числа зародышей в первом случае за счет диспергации пленки конденсата. Это подчеркивает важность учета конденсации на фрагментах дробления пленки.

Выводы к 3 главе. Экспериментами и оценками показано:

1. При изучении воздействия на парогазовую струю коронного разряда необходимо учитывать помимо гетерогенной конденсации на ионах, гетерогенную конденсацию на фрагментах дробления пленки конденсата, образующихся на срезе капилляра под воздействием электрического поля.
2. При смешанной конденсации экспериментально обнаружена и объяснена бимодальность распределения капель в дальней области струи с зависимостью размеров крупного аэрозоля от потенциала коронирующего электрода.
3. На режимах работы генератора $p = 1.4$ атм, $T_{\infty} < 24$ °C в результате конденсации на фрагментах дробления пленки с увеличением электрического поля около среза капилляра от $E=5 \times 10^4$ В/м до 1.5×10^5 В/м концентрация крупных капель аэрозоля увеличивается в 60–70 раз, а средний диаметр капель с 2 мкм уменьшается до 1 мкм;
4. На режимах работы генератора $p=1.4$ атм, $T_{\infty} < 32$ °C, $\varphi_0 > 7$ кВ в результате конденсации на гидратах ионов образуется фракция мелких капель аэрозоля со средним диаметром меньше 0.3 мкм;
5. При $p = 1.4$ атм, $T_{\infty} > 32$ °C конденсация не регистрируется.

Глава 4 посвящена анализу механизма диспергации оксидированных наночастиц быстрым нагревом с $dT/dt > 10^6$ К/с, например, в ударной волне; численным исследованиям динамики изменения ансамбля фрагментов диспергации в процессах испарения и воспламенения. Распределение исходных наночастиц считается максвелловским, а распределение кластеров в одиночном акте диспергации – нормальным. Результаты расчетов размеров фрагментов диспергации сопоставлялись с [10], а влияние распределения кластеров по размерам на время воспламенения смеси – с [13].

Диспергация оксидированной наночастицы Al трактуется соискателем в [A13-A16], как резонансно-волновой процесс распада расплавленного ядра, развивающийся в ответ на ударный импульс при разрушении ее оболочки в результате быстрого нагрева. Исследуются как свойства продуктов одиночного акта диспергации – характеристики распределения кластеров, так и свойства объектов диспергации – характеристики распределения исходных наночастиц, т.к. и те и другие могут влиять на процесс воспламенения. Среди разных типов распределений изучались двухпараметрические (с параметрами – медиана и дисперсия), и однопараметрические (– медиана). К двухпараметрическим относятся нормальное и логнормальное распределения, типичные для

процессов коагуляции, трещинообразования. Однопараметрическое распределение Максвелла подходит для случайного процесса образования вторичных частиц, в отсутствие их коагуляции, например, при плазменной переконденсации микрочастиц Al с малой добавкой Ba в дуговом разряде.

В § 4.1 описывается резонансный механизм диспергации одиночной наночастицы с необходимыми условиями его реализации (см. [A13, A14]), аналогичный механизму диспергации пленки конденсата под действием электрического поля и турбулентного парагазового потока (см. § 1.4).

Ударная волна нагревает наночастицу, в ней запасаются термоупругие напряжения при плавлении ядра и/или при его нагреве после плавления вплоть до разрушения оболочки. Жидкое ядро при сбросе оболочки толщиной d считается упругим шаром радиуса R . Длительность ударного импульса $t \sim R/c$ (c – скорость звука в ядре), ограничивает сплошной спектр вынуждающей силы $\Delta\omega < 2\pi/t$, которая действует на ядро и возбуждает ближайшую, гармонику собственных радиальных колебаний ядра $\omega = 0.816\pi c/R$ [16]. При расширении ядра из сжатого в недеформированное состояние энергия деформации переходит в кинетическую энергию. Свободная поверхность ядра теряет устойчивость, покрываясь гофром тангенциальных капиллярных колебаний. Энергия из радиальной моды переходит в тангенциальные моды той же частоты, возникающие, как на поверхности, так и внутри ядра. Поскольку скорость капиллярных возмущений на поверхности ядра гораздо меньше скорости звука в нем, длина волны тангенциальной моды резко уменьшается по сравнению с радиальной. В тангенциальных модах, узкодисперсных из-за резонанса, происходит интерференция с образованием стоячих волн. Рост амплитуд последних приводит к срыву жидких фрагментов (сферических кластеров) с пучностей на поверхности ядра. В объеме ядра сброс давления приводит к образованию и росту пузырей (кавитационных полостей), между которыми жидкие перемычки также начинают испытывать капиллярные колебания и распадаться на кластеры. Независимо от того, поверхностный или объемный характер имеет диспергация, следствием резонанса является совпадение минимальной частоты колебаний кластеров $\omega_{\min}^2 = 8\sigma_s/(\rho \cdot r^3)$ и частоты основной гармоники радиальных колебаний ядра $\omega \approx 0.81\pi c/R$. В результате получена оригинальная формула

$$R \approx c \sqrt{r^3 \rho / \sigma_s} \sim r^{3/2} \quad (2),$$

связывающая радиусы R и r исходной частицы и кластера. Тут σ_s – коэффициент поверхностного натяжения, ρ – плотность жидкого ядра. Условия диспергации: по температуре – необходимо, чтобы ядро было в жидком состоянии, а оболочка – в твердом; по коэффициенту теплового расширения – необходимо, чтобы у ядра оно было больше, чем у оболочки; критерий разрушения твердой оболочки – необходимо, чтобы термоупругие

напряжения превысили разрушающее напряжение σ_m в ней; энергетический критерий – необходимо, чтобы запасенной энергии деформации хватало для увеличения поверхностной энергии возникающих кластеров.

Показано, что размеры R и r при диспергации ограничены сверху и снизу. В экспериментах [10] в среде аргона диспергация Al-частиц $R=50$ нм, $d=2$ нм не происходила, а в воздухе при схожих условиях – происходила. Этот факт объясняется изменением свойств оксидной оболочки при нагреве – аморфный Al_2O_3 переходил в состояние γ -фазы (размер кристалла ~ 5 нм). В Ar из-за отсутствия окисления средняя толщина оболочки не меняется, поэтому в ней появляются разрывы при нагреве и снижается прочность ($d=2$ нм, $\sigma_m \sim 1$ ГПа). В воздухе или атмосфере H_2O/CO_2 оболочка увеличивает среднюю толщину и прочность за счет доокисления ядра при заполнении ее трещин Al_2O_3 ($d=5$ нм, для γ -фазы $\sigma_m \sim 10$ ГПа). Энергия деформации возрастает в десятки раз, что достаточно для диспергации.

В § 4.2 обосновывается взаимосвязь распределений исходных наночастиц и кластеров. Для скорости генерации кластеров q в случайном процессе диспергации обосновывалось распределение Максвелла по размерам около наиболее вероятного радиуса r_p :

$$dq/dr = \left(4q_0/\sqrt{\pi} \cdot r_p\right) \cdot (r/r_p)^2 \cdot \exp(-r^2/r_p^2) \quad (3).$$

По аналогии с наиболее вероятной скоростью максвелловского распределения молекул по скоростям в газе находился наиболее вероятный радиус кластера

$$r_p = 6\pi\sigma_s R^3 / WK^3 \quad (4),$$

где $K = \sqrt{3/2}$, т.е. мелкость распыла увеличивается с ростом подведенной энергии W . Результаты эксперимента по диспергации оксидированной Al частицы $R=50$ нм на кластеры $r=4-20$ нм [10] согласуются с расчетами (2) и (4): $r=4$ нм и $r_p \sim 2$ нм (при $W \sim 10^{12}$ Дж).

Из (2) и (3) было получено распределение кластеров среднемассовых размеров r_m резонансным диспергированием максвелловского ансамбля наночастиц:

$$dq/dr_m = \left(6q_0/\sqrt{\pi}\right) (5/3)^2 \cdot (r_m/r_{pp})^5 \cdot \exp(-5r_m^3/3r_{pp}^3) / r_{pp} \quad (5),$$

где r_{pp} – наиболее вероятный радиус кластера в (5). Для итогового ансамбля кластеров необходимо учитывать распределение (5) совместно с нормальным распределением кластеров для каждого единичного акта диспергации $\left(q_0/\sqrt{2\pi}\mu r_p\right) \cdot \exp\left(-(r-r_p)^2/\mu^2 r_p^2\right)$. Это было выполнено численно суммированием нормальных распределений кластеров от отдельных актов диспергации (для разных дисперсий $\mu_{1,2,3}$). Последним были присвоены статистические веса согласно распределению среднемассовых кластеров (5).

В § 4.3 исследуются виды дисперсий $\mu_{1,2,3}$ распределения кластеров при поверхностной/объемной диспергации одиночной наночастицы. После сброса

оболочки возникают капиллярные колебания свободной поверхности жидкого ядра наночастицы. Дисперсии капиллярных волн $\mu_1 = \Delta\lambda / \lambda$ и размеров кластеров $\mu_1 = \Delta r / r$ одинаковы в силу соотношения $\lambda = \pi r$ и оцениваются для условий [10] из требования когерентности волн $R < \lambda^2 / 2\Delta\lambda$ на поверхности ядра:

$$\mu_1 < (0.5\pi / c) \cdot \sqrt{\sigma_s / \rho r} \sim 0.1 \quad (6).$$

Аналогично, для поверхностной диспергации при взаимодействии ядра с оболочкой в условиях [10], оценивается дисперсия:

$$\mu_2 = \Delta r / r \approx \sqrt{2d / R} \approx 0.2 \quad (7).$$

Дисперсия размеров кластеров при их объемной диспергации $\mu_3 = \Delta r / r$ оценивается с учетом того, что в жидком ядре при разрушении оболочки падает давление от $p_1 = 2\sigma_m d / R$ до $p_2 = 2\sigma_s / R$. Жидкость переходит в неустойчивое перегретое состояние. В местах пучностей стоячих волн возникают разрывы сплошности, т.е. образуются пузыри, происходит объемное вскипание перегретой жидкости в ядре, рост пузырей, разрушение их перемычек и диспергирование на кластеры. По формуле Миннерта известна собственная частота радиальных колебаний уединенного зародыша пузыря радиуса R_b :

$$\nu = \sqrt{(3\gamma p_{1,2} / \rho) + (2\sigma_s (3\gamma - 1) / \rho R_b)} / 2\pi R_b \quad (8),$$

где γ – коэффициент Пуассона ядра. При резонансе совпадают частоты радиальных колебаний ядра $\omega \approx 0.81\pi c / R$, колебаний кластера $\omega_{\min}^2 = 8\sigma_s / (\rho \cdot r^3)$ и зародыша пузыря (8). Из равенства частот для Al наночастиц 10 нм - 1 мкм получена иерархия масштабов: $R > r > R_b$ и $R \sim r^{3/2} \sim R_b^2$. Центры зародышей пузырей совпадают с пучностями волн деформации отстоящими друг от друга на $\lambda/2$. Количества зародышей пузырей $N_b \approx 32\pi R^3 / 3\lambda^3$ и кластеров $N = R^3 / r_m^3$ примерно равны, т.е. $\lambda / 3 \approx r_m$ и дисперсия $\Delta\lambda / \lambda = \Delta r / r$. Из ограничения на длину когерентности волн $L = \lambda^2 / 2\Delta\lambda > R$ получим $\mu_1 \approx \mu_3$.

В § 4.4 представлены результаты расчетов воспламенения в различных окислительных средах при диспергации Al наночастиц без учета их распределения по ансамблю. При анализе времени и температуры газофазного воспламенения Al в атмосфере паров $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ (после диспергации) использовались результаты [A12], см. рис.7, 8. Исходный детальный кинетический механизм из [A9] включал в себя 363 химические реакции с участием 92 компонентов, среди которых: Al, Al(l), Al_nO_m , $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{l})$, $\text{Al}(\text{OH})_m$, AlO_2H , O_n , CO_n , H_n , HO_n , H_2O_n , $n=1..2$, $m=1..3$. В модифицированном механизме из [A12] компонент Al(l), характеризующий жидкие Al частицы, заменен

ансамблем кластеров Al_n ($n=1...250$), а реакция испарения $Al(l) \leftrightarrow Al(g)$ заменена цепочкой реакций последовательного отсоединения Al атома от кластеров Al_n : $Al_n \leftrightarrow Al_{n-1} + Al$, $n=2...250$. Реакции цепочки являются обратимыми. Моделирование в пакете программ CHEMKIN (рис.7, 8) проводилось в приближении замкнутого адиабатического реактора постоянного объема. Были выбраны частицы с ядрами: 1) $R = 8.6$ нм, которые диспергируются на кластеры Al_{250} в количестве $N = 290$ штук; 2) $R = 5.4$ нм – Al_{100} , $N = 180$; 3) $R = 3.9$ нм – Al_{50} , $N = 130$.

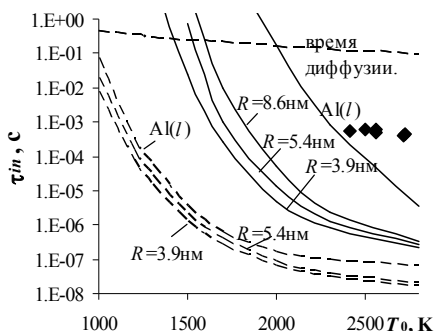


Рис.7 Время задержки воспламенения τ_{in} стехиометрических топливных смесей $Al+CO_2$ (сплошные) и $Al+O_2$ (штрих) в зависимости от радиусов R исходных оксидированных частиц Al при начальном давлении $P_0=1$ атм. Ромбы – экспериментальные данные для Al частиц диаметром 20 мкм в смеси с 99% O_2 -1% N_2 при $P=17$ атм [17]

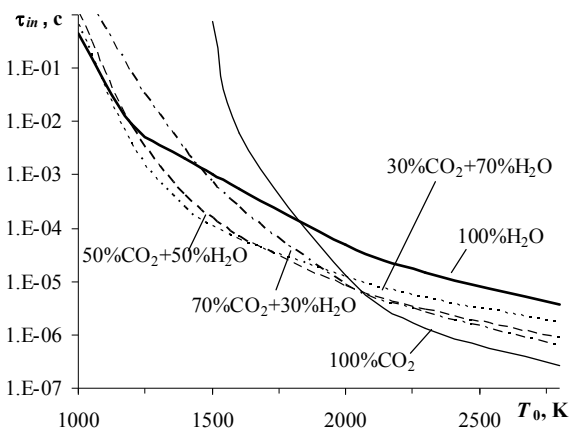


Рис.8 Время задержки воспламенения τ_{in} стехиометрических топливных Al смесей при начальном давлении $P_0=1$ атм с различным соотношением окислителей CO_2/H_2O , где Al представлен в виде оксидированных наночастиц радиуса $R=5.4$ нм диспергируемых на кластеры Al_{100}

Видно (рис.7): с уменьшением R в ~ 2 раза время τ_{in} уменьшается на порядок при температуре диспергации $T_0=const$. Пунктиром обозначено время диффузии радикалов в зоне воспламенения ~ 1 см, ограничивающее температуру воспламенения T_{ign} : чем больше R , тем T_{ign} выше. Как другой предельный случай, на рис.7 показано время задержки воспламенения τ_{in} неокисленной жидкой частицы $Al(l)$ с реакцией испарения $Al(l) \leftrightarrow Al(g)$. Этот

случай дает самые высокие τ_{in} и T_{ign} . Для сравнения ромбами показано время воспламенения крупных частиц 20мкм [17] в O_2 при повышенном давлении, которое значительно больше из-за смены механизма воспламенения. Из рис.8 следует, что для начальной температуры $T_0 > 1800K$ при учете диспергации наночастицы Al радиуса $R = 5.4nm$ на кластеры Al_{100} воспламенение в парах CO_2 происходит быстрее, чем в парах H_2O . С учетом реакции $Al(l) \leftrightarrow Al(g)$ смена эффективности окислителей происходит только при $T_0 > 2200 K$.

В § 4.5 представлены результаты расчетов параметров распределений наночастиц и кластеров, времени воспламенения и динамики ансамбля последних. На рис.9 показаны аппроксимации наблюдаемого в эксперименте [13] исходного распределения оксидированных наночастиц Al различными модельными кривыми. Для марки порошка “SkySpring 50nm”, средний диаметр частиц составил $D_r = 73.2$ нм, толщина оболочки $d = 1.5-2.5$ нм, а среднемассовый диаметр - $D_m = 80.9$ нм. Зная из теории максвелловского распределения наиболее вероятное значение диаметра наночастицы можно восстановить для наночастиц функцию распределения (3) (сплошная линия). Дополнительно определив дисперсию из эксперимента можно найти логнормальное распределение наночастиц (штриховая линия). Ансамбль наночастиц из [13] оказался гораздо ближе к максвелловскому распределению, нежели к логнормальному. Кроме того, экспериментальные точки распределения ансамбля наночастиц (ромбы) пересчитывались в точки распределения кластерного ансамбля среднемассовых размеров (квадраты): среднемассовые размеры кластеров для каждого отдельного акта диспергации вычислялись согласно (2), а их количество – из условия несжимаемости жидкости. По дискретному распределению кластерного ансамбля среднемассовых размеров находился наиболее вероятный размер кластеров, по которому восстанавливалось распределение (3) – пунктирная кривая, т.е. проверялась гипотеза о максвелловском распределении кластеров. Данное распределение (пунктир) сравнивалось с другим (сплошная линия), полученным аналитически для среднемассовых кластеров в рамках резонансного механизма диспергации по формуле (5) из восстановленного максвелловского распределения наночастиц (сплошная линия). Последнее распределение кластеров (сплошная линия, уширение $\Delta r/r_p = 0.44$) выглядит более узким по сравнению с максвелловским (пунктир, $\Delta r/r_p = 0.80$), что согласуется с теорией резонанса. Данные о среднемассовых размерах кластеров (квадраты) лучше совпадают с формулой (5) (сплошная), чем с максвелловским распределением (пунктир).

В диссертации проверялась важность учета распределения кластеров по размерам при расчете τ_{in} . В [13] указана экспериментальная зависимость от времени интегральной светимости при горении за ударной волной порошка “SkySpring 18nm” оксидированных Al наночастиц $D_m=18$ нм ($T_0=1500$ К, $P_0=20$ атм, $O_2/N_2=1/4$). Жидкое ядро отдельной частицы диспергируется на кластеры с

$d_m=1.5$ нм согласно (2). Распределение таких кластеров в диапазоне диаметров 0.3-3.3 нм учитывает 99% всего количества Al ядра, т.е. соответствует возможностям модифицированного кинетического механизма [A12], дополненного для описания испарения крупных кластеров реакциями $Al_n \leftrightarrow Al + Al_{n-1}$ с $n=251-999$. Распределение исходных наночастиц считалось максвелловским, т.к. с одной стороны для порошка “SkySpring 18nm” в [13] нет информации о распределении наночастиц по размерам, а с другой стороны для порошка “SkySpring 50nm” максвелловское распределение удовлетворительно согласуется с экспериментом [13]. По экспериментальной кривой светимости из [13] время воспламенения оксидированных наночастиц алюминия с $D_m=18$ нм оценивалось соискателем от момента начала излучения до достижения пика его интенсивности $\tau_{in}=8-13$ мкс, что примерно на порядок меньше времени горения, определяемого в [13], как 74 ± 20 мкс. Расчетное время воспламенения смеси с коэффициентом стехиометрии $\phi=0.28$ составило ~ 8 мкс (дисперсия $\mu_{1,3}$), что хорошо согласуется с первой оценкой на основе экспериментальных данных. Наиболее вероятный диаметр кластера составляет 1.5 нм, что соответствует кластеру Al_{94} .

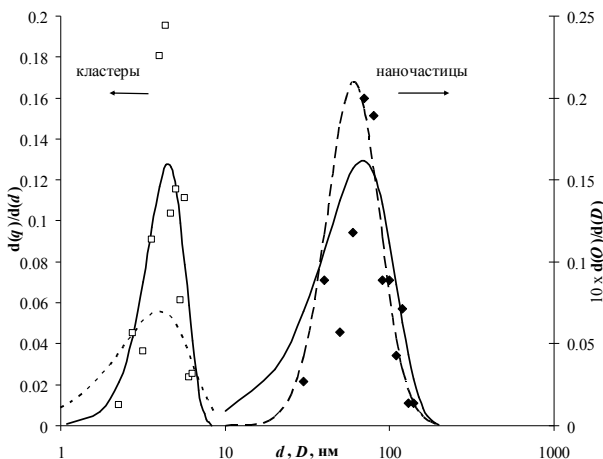


Рис.9 Распределения Al-наночастиц и кластеров (нормированы на 1). Символы: ромбы – наночастицы с $D_m=80.9$ нм из [13], квадраты – кластеры по формуле (2). Кривые: сплошные – распределение Максвелла для наночастиц по формуле (2) и на его основе распределение кластеров по формуле (5); штрих – логнормальное распределение наночастиц; пунктир – распределение Максвелла для кластеров по формуле (3).

На рис.10 показана эволюция распределения Al кластеров перед воспламенением в этом режиме для дисперсий $\mu_{1,3}$. Распределение кластеров при упрощенном подходе заменяют монодисперсными фракциями: с наиболее вероятным $d_p=1.5$ нм (Al_{94}) или среднемассовым размером $d_m=1.55$ нм (Al_{126}). В условиях [13] по рис.10 видно, что с течением времени распределение деформируется – увеличивается доля мелкой фракции кластеров и уменьшается доля крупной фракции. После воспламенения фактически остаются только мономеры Al. Расчеты с учетом дисперсий $\mu_{1,3}$ показали

хорошее согласие с экспериментом [13]. Оказалось, что, распределение кластеров лучше заменять кластерами среднемассовых размеров, нежели кластерами наиболее вероятных размеров. Случай поверхностной диспергации (он не наблюдался в [10]) с дисперсией μ_2 дает $\tau_m=18.6$ мкс, что ~ 2 раза больше, чем в эксперименте, поэтому взаимодействие ядра с оболочкой следует исключить из рассмотрения.

Выводы к 4 главе:

1. Разработанный резонансный механизм объемной диспергации окисдированных наночастиц согласуется с экспериментальными данными о средних размерах вторичных кластеров Al, по особенностям диспергации наночастиц Al в воздухе и аргоне.
2. С помощью разработанных механизмов резонансной диспергации и кинетики окисления алюминия выявлены отличия времени и температуры воспламенения для разных значений среднего размера Al наночастиц и разных составов окислительных сред (O_2 , H_2O и CO_2).
3. Измеренное в эксперименте исходное распределение наночастиц Al удовлетворительно описывается максвелловским распределением и не является резонансным, а распределение вторичных кластеров, полученное на основе разработанного резонансного механизма диспергации, напротив, имеет резонансный характер, не совпадает с максвелловским.
4. Разработанные механизмы резонансной объемной диспергации и кинетики окисления алюминия согласуется с экспериментами по воспламенению Al наночастиц в воздухе за ударной волной.

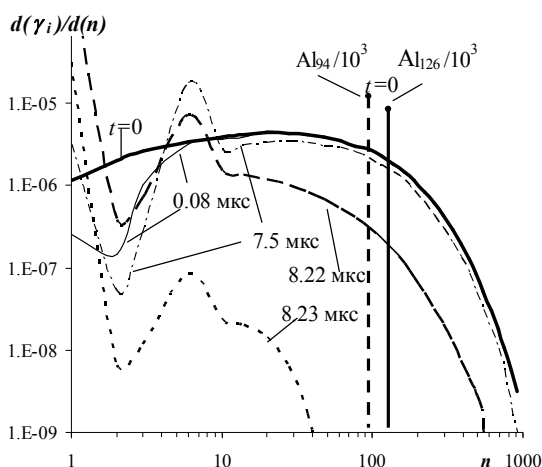


Рис.10 Эволюция распределения мольной доли γ_i Al-кластеров с дисперсией $\mu_{1,3}$ до момента воспламенения ($\tau_{in}=8.98$ мкс) в смеси $Al_n+20\%O_2+80\%N_2$ за ударной волной при $T_0=1500$ К, $P_0=20$ атм, $\phi=0.28$. Начальное распределение Al_n по формуле (5) при диспергации окисдированных наночастиц Al "SkySpring 18nm" с $D_m=18$ нм [13]. Вертикали – мольные доли монодисперсных фракций Al_n : медианная (Al_{94}) и среднемассовая (Al_{126}).

В заключении изложены главные результаты исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана и изготовлена экспериментальная установка по наблюдению конденсации парогазовой струи в коронном разряде. При протекании парогазового потока через капилляр в электрическом поле экспериментально обнаружена конденсация аэрозоля на фрагментах дробления пленки конденсата, определен диапазон условий ее существования.
2. Разработан механизм резонансной диспергации пленки конденсата в парогазовом потоке под действием сильного электрического поля. Он позволяет рассчитать размер и дисперсность микрокапель и сконденсировавшихся на них капель аэрозоля, которые определяются резонансно-капиллярными эффектами, возникающими в пленке на срезе сопла под действием сильного электрического поля.
3. Экспериментально исследована интенсификация совместно протекающих процессов коронного разряда и испарения в парогазовой среде, получена эмпирическая формула без привлечения кинетической модели коронного разряда, объясняющая зависимость тока коронного разряда от температуры насыщенного водяного пара.
4. Разработан резонансный механизм диспергирования окисированных наночастиц Al, который позволяет предсказать средний размер фрагментов диспергации и уточнить их функцию распределения. Результаты удовлетворительно согласуются с известными экспериментами [10]. Кроме того, дано объяснение в рамках необходимых условий диспергации - почему это явление не происходит в инертной атмосфере, но происходит в окислителе.
5. Предложенные механизмы резонансной диспергации и кинетики окисления Al совместно позволяют описать воспламенение наночастиц Al в разных окислительных средах в зависимости от их средних размеров и функции распределения. Результат удовлетворительно согласуется с известным экспериментом [13].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] П.С. Кулешов Экспериментальные исследования влияния электрогазодинамических параметров на конденсацию в парогазовой струе // XIV школа-семинар “Аэродинамика летательных аппаратов”, Жуковский, 2003
- [A2] П.С. Кулешов Изучение возможностей по управлению конденсацией в парогазовой струе с помощью оптической диагностики потока // VII Международная научная конференция “Оптические методы исследования потоков”, Москва, 2003
- [A3] П.С. Кулешов, Ю.В. Маношкин Экспериментальные исследования влияния электрического поля на пленку водного конденсата в диэлектрических соплах // V Международная научная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях, Самара, 2004

- [A4] *П.С. Кулешов, Ю.В. Маношкин* Исследования динамики течения пленки конденсата в сильном электрическом поле с помощью цифрового микроскопа, VIII Международная научная конференция Оптические методы исследования потоков, Москва, 2005
- [A5] *П.С. Кулешов, Ю.В. Маношкин* О дроблении пленки водного конденсата в парогазовом потоке в присутствии сильного электрического поля // Электронный журнал "Исследовано в России". 2005. 226. с. 2323-2335
- [A6] *П.С. Кулешов* Экспериментальное изучение взаимодействия коронного разряда и испарения воды // Электронный журнал "Исследовано в России". 2005. 227, с. 2336-2343
- [A7] *П.С. Кулешов, Ю.В. Маношкин* Влияние электрического поля на формирование и дробление пленки конденсата на стенках капилляра в потоке водяного пара // ТВТ. 2009. Т.47, №1, с. 108-116
- [A8] *П.С. Кулешов, Ю.В. Маношкин* Генератор микронного и субмикронного водяного аэрозоля с электрическим управлением // ТВТ. 2009. Т.47 №6, с. 937-945
- [A9] *A.M. Starik, P.S. Kuleshov, A.S. Sharipov, N.S. Titova* Kinetics of ignition and combustion in the Al-CH₄-O₂ system // Energy & Fuels. 2014. Т.28, №10, p. 6579-6588
- [A10] *A.M. Starik, P.S. Kuleshov, A.S. Sharipov, N.S. Titova, C.J. Tsai* Numerical analysis of nanoaluminum combustion in steam // Combust.Flame. 2014. Т.161, №6, p. 1659-1667
- [A11] *P.S. Kuleshov, A.M. Savel'ev, N.S. Titova, A.M. Starik* Modeling of Al nanoparticle combustion in CO₂ environment // сборник: Nonequilibrium processes in physics and chemistry Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere. Ed. by A.M. Starik, S.M. Frolov. Moscow. 2016. с. 80-88
- [A12] *P.S. Kuleshov, A.M. Saveliev, N.S. Titova, A.M. Starik* Modeling study of Al nanoparticle oxidation in CO₂/H₂O environment // 9th International seminar on flame structure (9 ISFS). 2017. p. 63
- [A13] *П.С. Кулешов* Резонансный механизм диспергирования наночастиц // Труды 61-ой Всероссийской научной конференции МФТИ, 19-25 ноября 2018, Москва-Долгопрудный-Жуковский. МФТИ. 2018. с. 328.
- [A14] *П.С. Кулешов* О диспергировании наночастиц алюминия // Горение и Взрыв. 2019. Т.12, №3, с. 118-127
- [A15] *П.С. Кулешов, А.М. Савельев* Способ диспергирования трудно-воспламеняемых наночастиц бора // Патент RU2701249, от 25.09.2019
- [A16] *П.С. Кулешов, А.М. Савельев* Численное исследование воспламенения наночастиц Al при их диспергации за ударной волной // Сборник тезисов XI Всероссийской научно-технической конференции с междунар. участием "Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей", Россия, г.Самара, 26-27.09.2019: Из-во Самарского Университета, 2019, с. 65-67

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] *А.Г. Амелин.* Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. – Москва: Химия. 1966. 296 с.
- [2] *Т.С. Басиев, И.П. Вережагин, Л.М. Макальский, и др.* Генераторы заряженного аэрозоля. - Известия Академии Наук СССР, Энергетика и Транспорт. 1982. №5, с. 118-127
- [3] *Д.Г. Пажи, В.С. Галустов* Распылители жидкости. - Москва: Химия. 1979
- [4] *А.У. Сулимов и др.* Вопросы теории электростатического распыливания и интенсификации процессов сгорания жидких топлив. – Ташкент. 1968
- [5] *А.М. Савельев, А.М. Старик* Динамика образования сульфатных аэрозолей в струях реактивных двигателей // МЖГ. 2001. №1, с. 11-23
- [6] *К. Борен, Д. Хафмен* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. - Москва: Мир. 1986
- [7] *А.Б. Ватажгин, И.Р. Сафин, Е.К. Холицевникова* Исследование различных режимов конденсации в изобарических турбулентных паровоздушных струях // МЖГ. 2002. №6, с. 32-45
- [8] *A. Vatazhin, A. Lebedev, V. Likhter, V. Shulgin, A. Sorockin* Turbulent air-steam jets with a condensed dispersed phase: Theory, experiment, numerical modeling // J. Aerosol. Sci. 1995. V.26. №1. p. 71-93
- [9] *В.Н. Бакулин, Н.Ф. Дубовкин, В.Н. Котов и др.* Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей // Под ред. Л.С. Яновского. – Москва: Физматлит. 2009
- [10] *Y. Ohkura, P. M. Rao, and X. Zheng* Flash ignition of Al nanoparticles: mechanism and applications. Combust. Flame. 2011. 158:2544–2548
- [11] *V.I. Levitas* Burn time of aluminum nanoparticles: Strong effect of the heating rate and melt-dispersion mechanism // Combust. Flame. 2009. 156:543–546
- [12] *Д. Сандарам, В. Янг, В.Е. Зарко* Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 2. с. 37-63
- [13] *D. Allen, H. Krier, N. Glumak* Heat transfer effects in nano-aluminum combustion at high temperature // Combust. Flame. 2014. 161. p. 295-302
- [14] *С.Ф. Чекмарев* Течение и теплообмен в жидкой пленке масла, стекающего по стенке пароструйного вакуумного насоса // Сборник “Газодинамика процессов струйной вакуумной откачки” под ред. С.С. Кутателадзе, Новосибирск, 1985, с. 137-145
- [15] *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц* Теоретическая физика // Учебное пособие, Т. 6. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. – Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. 738 с.
- [16] *В. Новацкий* Теория упругости // Монография, Москва: Мир. 1975. 872с.
- [17] *T.A. Roberts, R.L. Burton, H. Krier* Ignition and combustion of aluminum / magnesium alloy particles in O₂ at high pressures // Combust. Flame. 1993. Vol. 92. p. 125-143.
- Благодарности:** А.М. Савельеву, И.Н. Кадочникову, Н.С. Титовой, В.И. Копченкову, А.С. Шарипову за полезные обсуждения