

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ АГЛОМЕРАТОВ МЕТОДОМ ОТБОРОВ

О. Г. Глотов, В. Е. Зарко, В. В. Карасев

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск

Рассмотрены вопросы интерпретации информации, получаемой в результате анализа отобранных частиц конденсированных продуктов горения алюминизированных топлив. Показано, что возникающие трудности вызваны тремя основными причинами: сложным статистическим характером процесса горения гетерогенного топлива, вследствие чего образуются агломераты с существенно полидисперсным распределением по размеру и различной (даже при одинаковом размере) структурой; особенностями выгорания агломератов, связанными с накоплением оксида на горячей частице; специфическим характером движения горящих агломератов в обтекающем газовом потоке. Предложен экспериментальный подход, позволяющий избавиться от полидисперсности агломератов и неопределенности в параметрах газообразных продуктов, оттекающих от поверхности горения.

Один из путей повышения энергетических параметров твердых топлив (ракетных, плазменных, пиротехнических или иных) — введение в их состав порошкообразного алюминия. Однако реализация высокой теплотворной способности химического взаимодействия алюминия с окисляющими агентами зависит от особенностей процесса горения как в приповерхностном слое внутри топлива, так и в газовой фазе вблизи поверхности. Характерная особенность горения алюминизированных топлив — явление агломерации, вследствие которого металлический алюминий покидает поверхность горения и выходит в газовую фазу, в основном в составе агломератов, а не в виде сравнительно мелкодисперсного порошка, заложенного в топливо.

Изучение агломерации можно разделить на внутреннюю и внешнюю задачи. Решение внутренней задачи подразумевает получение ответов на два основных вопроса: 1) как образуются агломераты и 2) каковы их характеристики при отрыве от поверхности горения. На практике решение внутренней задачи сводится к определению функции распределения агломератов по размерам, определению структуры и химического состава агломератов (минимально — хотя бы соотношения оксид/металл), а также выявлению взаимосвязи между характеристиками агломератов при вариации условий сжигания и химическим и гранулометрическим составом исходных компонентов топ-

лива. Внешняя задача подразумевает исследование динамики выгорания агломератов в потоке газообразных продуктов горения топлива. С точки зрения энерговыделения наибольший интерес представляет скорость расходования металлического алюминия, а для рассмотрения особенностей движения двухфазной среды важны размер и масса агломератов. Следует иметь в виду, что динамику выгорания невозможно рассматривать отдельно от движения агломератов, поскольку необходимо учитывать время пребывания агломератов в тех или иных условиях по температуре и/или составу газовой среды, относительную скорость обтекающего газа и т. д. Перечисленные вопросы, имеющие отношение к внутренней и внешней задачам агломерации, напрямую связаны с эффективностью использования металла в составе топлива, и потому весьма актуальны для практики. В то же время, уровень понимания процессов, протекающих при горении гетерогенных топлив, пока не позволяет построить адекватную физико-математическую модель. Имеющиеся модели агломерации в лучшем случае соответствуют качественным закономерностям, полученным экспериментально для типичных металлизированных топлив, но не способны предсказать, например, функцию распределения агломератов по размерам. Единственный источник необходимой информации о частицах, покидающих поверхность горения, а также о поведении этих частиц при

движении от поверхности горения — эксперимент с присущими ему погрешностями и проблемами, связанными с интерпретацией полученных данных.

В настоящей работе обсуждены типичные трудности, возникающие при анализе данных отборов конденсированных продуктов горения. В итоге предложен экспериментальный подход, который позволит обойти трудности, связанные с полидисперсностью агломератов и неопределенностью в параметрах газа, оттекающего от поверхности горения.

## ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

Анализ литературы показывает (см., например, обзор [1]), что для получения информации о дисперсной фазе в продуктах горения топлива повсеместно используются контактные методы диагностики. Суть контактных методов состоит в гашении, отборе и последующем всестороннем анализе частиц с целью определения их гранулометрического, химического, морфологического составов и других требуемых характеристик. Для контактных методов диагностики характерны общие проблемы и трудности, часть которых успешно преодолена, но другие имеют принципиальный характер, ограничивая применение метода отбора. Большинство методических проблем неоднократно обсуждалось в соответствующей литературе [2], поэтому здесь ограничимся их перечислением с краткими комментариями.

**1. Представительность отборов.** Проблема представительности обусловлена чрезвычайно широким диапазоном размеров частиц, образующихся при горении топлива, — от субмикронного оксида до миллиметровых агломератов. В лабораторных методиках реализованы два варианта решения этой проблемы. Первый состоит в сжигании малого образца топлива и сбора всей массы частиц для последующего анализа (см. [3–6] и др.). В другом варианте представительность отбора обеспечивается только для интересующего диапазона размеров частиц (обычно это либо агломераты, либо оксидные частицы) [2, 7–9] и др. В некоторых случаях исследователи путем расчета или экспериментально определяют эффективность улавливания (отбора) частиц в зависимости от их размера [10, 11].

**2. Неадиабатичность горения малоразмерного образца в лабораторных условиях.** Это пример

проблемы, не решаемой в рамках применяемого подхода. Можно ожидать, что в лабораторных установках недогорание металла завышено по отношению к процессу в реальном двигателе. Поэтому к полученным данным по недогоранию следует относиться как к оценке сверху.

**3. Неопределенность во времени реагирования частиц до гашения.** Проблема обусловлена как неопределенностью в местоположении замораживания частиц, так и отсутствием достоверной информации о движении частиц и протекании самого процесса гашения. Под гашением (иначе — замораживанием) подразумевают резкое снижение скорости реагирования частицы как в результате ее охлаждения, так и в результате принудительного изменения окисляющей способности среды. Динамика процесса гашения металлической частицы практически не изучена, движение частиц будет рассмотрено ниже, поэтому в данном параграфе ограничимся комментариями о нахождении местоположения замораживания частиц.

При замораживании частиц в инертном газе обычно считают, что гашение частиц происходит при пересечении некоторой условной поверхности, положение которой определяют, основываясь на гидродинамической картине течения и смешения потока газообразных продуктов горящего образца и замораживающего газа. Так, например, в нашей методике [5] за поверхность гашения принимали плоскость, параллельную поверхности горения и отстоящую от среза стаканчика или охранной трубки на расстояние, равное длине начального участка смешения струи продуктов горения образца топлива с окружающим газом. Ограниченность такого простейшего подхода очевидна.

Не следует думать, что неопределенность в местоположении замораживания частиц отсутствует при использовании методик отбора в неподвижную жидкость [8] или методик с вращающимся барабаном [12–14]. Дело в том, что горящие частицы могут отскакивать от поверхности жидкости. В условиях ограниченного пространства бомбы отскокившие частицы, даже будучи в конце концов уловленными, имеют время гашения заведомо отличное от номинального. Утверждение о возможном отскоке частиц базируется на проведенном нами эксперименте с визуализацией взаимодействия факела топливного образца с поверхностью воды. Параметры эксперимента: давление 1 атм, направление факела и движения частиц совпада-

ло с вектором силы тяжести, размер агломератов 470 мкм (использовано специальное топливо, генерирующее монодисперсные агломераты), диаметр образца топлива 12 мм, расстояние до поверхности воды 38 мм, скорость горения 1 мм/с, скорость оттока газообразных продуктов от поверхности горения 16 м/с, глубина выдуваемого на поверхности воды мениска не превышала 1 мм. В этих условиях примерно каждая вторая частица отскакивала от поверхности воды. Какого-либо изменения яркости свечения частиц после отскока не наблюдали.

В [15] для локализации местоположения замораживания горящих индивидуальных частиц предложено оригинальное техническое решение. Суть его состоит в следующем. Имеется камера, разделенная на две части пленкой поверхностно-активного вещества. В одной части среда окислительная, в другой — инертный газ. Движущаяся в окислительной среде горящая частица металла пробивает пленку и практически мгновенно оказывается в среде инертного газа, так что время тушения составляет  $\approx 100$  мкс. Однако в последующих работах авторы отказались от этого способа в пользу гашения частицы на алюминиевой пластине, поскольку обнаружили, что при гашении в инертном газе частицы раздувались с образованием внутренних пустот. Иначе говоря, размер и структура погашенной частицы оказались зависящими от способа гашения [16].

**4. Трансформация пробы в процессе замораживания и за время между отбором и анализом.** Существует два аспекта проблемы — изменение размера, плотности и других характеристик частиц непосредственно в процессе гашения, а также химико-физические изменения при хранении пробы после отбора. Авторам известны две работы [13, 17], в которых рассмотрено влияние природы гасящей жидкости на окисление отобранных частиц. В литературе имеется также информация об изменении формы частиц при вариации расстояния от источника частиц до гасящей жидкости [10].

В наших упомянутых выше экспериментах по визуализации взаимодействия факела образца с водой наблюдалось движение светящихся частиц под поверхностью воды в паровом следе, длина которого достигала 6 мм. Погашенные частицы зачастую приобретали форму продолговатого полого тела вращения с соотношением длины и диаметра до трех.

Реализованное в нашей методике [5] замораживание частиц в спутном потоке инертного газа, в отличие от жидкости, имеет щадящий характер. Тем не менее практически всегда погашенные агломераты сферической формы имеют характерный выступ, обогащенный металлом, что можно трактовать как своеобразное искажение формы частиц. Морфология типичного агломерата — сравнительно рыхлое ядро, покрытое оксидной оболочкой [18]. На средней и поздней стадиях реагирования эта оболочка покрывает почти всю поверхность, за исключением малого участка — отверстия. При закалке агломерата, по-видимому, сначала затвердевает оксидная оболочка, а материал ядра выдавливается через отверстие. При атмосферном давлении наблюдается выход металла из отверстия в виде блестящего шарика. При проведении гранулометрического анализа под микроскопом размер частиц мы оценивали по диаметру оболочки, игнорируя выступ и предполагая, что выступающий материал до затвердевания оболочки находился внутри нее.

В дополнение укажем, что отобранные частицы при хранении на воздухе в течение нескольких недель способны доокисляться, что можно заметить по появлению на их поверхности белого или серого рыхлого налета. Появление налета сопровождается приростом массы частиц, который может достигать 10 %. Частицы, замороженные на ранней стадии горения, в результате постокисления становятся хрупкими и разрушаются. Естественный путь предотвращения доокисления частиц — хранение их в среде инертного газа.

#### СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ТРУДНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ОТБОРОВ

В ИХКиГ на протяжении более 15 лет развивается контактная методика [5], основанная на замораживании горящих частиц путем смешения продуктов горения топливного образца со спутным потоком инертного газа с последующим отбором и анализом частиц. С целью вариации времени реагирования агломератов используются охранные трубки разной длины  $L$  с внутренним диаметром, равным диаметру образца. Внутри трубки частицы находятся в продуктах горения топлива, а замораживание частиц происходит после выхода продуктов из трубки. Основное преимущество методики по сравнению с другими — широкий диапазон размеров улавливаемых частиц, обес-

печиваемый применением металлических ситовых сеток и аэрозольного фильтра, что дает возможность исследовать в одной установке одновременно агломераты и оксидные частицы. В данном разделе будут представлены примеры типичных трудностей, с которыми пришлось столкнуться при анализе результатов отборов частиц-агломератов. Частицы мелкодисперсного оксида должны быть предметом отдельного рассмотрения и здесь не затрагиваются.

**1. Полидисперсность агломератов.** Агломерация алюминия, как и горение гетерогенного топлива в целом — сложный статистический процесс. Так, структуру топлива, включая так называемые «карманы», образованные между зернами самого крупного компонента, можно охарактеризовать с использованием статистических методов. Стационарная скорость горения может быть измерена экспериментально и по сути также является статистическим параметром, осредняющим процессы, происходящие в масштабе, сопоставимом с размером дисперсных компонентов топлива, по горячей поверхности топливного образца. Образование агломератов того или иного размера в большей степени (чем скорость горения) подвержено случайным факторам, поскольку является результатом сугубо нестационарных процессов, протекающих в пространственном масштабе, близком к размеру карманов. Для топлива с несколькими фракциями окислителя внутри большого кармана можно рассматривать меньшие карманы, образованные между зернами следующей по крупности фракции, и т. д. [19].

Легко представить ситуацию, когда из-за локального отклонения компонентного состава топлива от номинального может образоваться агломерат с массой, намного превышающей массу среднестатистического агломерата. Такое событие вряд ли отразится на скорости горения, но при вычислении средних размеров высоких порядков будет заметно. Фактор микрокомпозиционной неоднородности топлива может быть особенно значим в лабораторных условиях при использовании образцов топлива небольшого размера. В связи с этим возникает вопрос о представительности и воспроизводимости результатов анализа частиц, отобранных при горении малого образца. Для оценки влияния этого фактора нами проведены специальные эксперименты с образцами массой  $\approx 0,7$  г. Конденсированные продукты горения

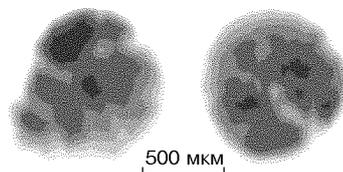


Рис. 1. Неоднородность внутренней структуры погашенных агломератов

от каждого образца независимо анализировали, затем результаты сравнивали. Было установлено, что для агломератов отличие в средних размерах высоких порядков ( $D_{43}$ ,  $D_{53}$ ) становится меньше погрешности измерения размера при осреднении по трем образцам (суммарная масса не менее 2 г)<sup>1</sup>.

Необходимо отметить, что кластеризация порошковых материалов является не следствием технологических нарушений в процессе приготовления топлива, а закономерным результатом, обусловленным хаотичностью исходной упаковки частиц [20]. Таким образом, на размер и структуру агломератов, помимо природы топливных компонентов, воздействуют как статистические факторы (состав и упаковка топлива), так и случайные факторы, обусловленные, по-видимому, микрокомпозиционной неоднородностью топлива. В результате распределение агломератов по размеру существенно полидисперсно, массовая функция распределения, как правило, имеет протяженный правый хвост, иногда многомодальна. Указанные особенности обычно обсуждают в терминах докарманного, карманного и межкарманного механизмов агломерации [21].

Для иллюстрации неоднородной внутренней структуры погашенных агломератов на рис. 1 представлена рентгеновская фотография агломератов фракции  $590 \div 880$  мкм, отобран-

<sup>1</sup>С учетом микрокомпозиционной неоднородности топлива сравнение данных отборов и визуализации дисперсной фазы вблизи поверхности методом скоростной киносъемки не совсем корректно, поскольку на пленке регистрируются процессы, происходящие за короткий промежуток времени в небольшой по объему визуализируемой зоне. Практически, чтобы обеспечить измерение частицы с размером  $\approx 100$  мкм, требуется увеличение на пленке в 2–3 крат, что ограничивает размер визуализируемой зоны объекта до  $5 \times 5 \times 1$  мм, а длительность регистрации при частоте съемки  $2000 \div 3000$  кадр/с не превышает 0,7 с. При скорости горения 10 мм/с и плотности топлива  $1,6$  г/см<sup>3</sup> на одной пленке регистрируется фрагмент процесса, соответствующий выгоранию всего  $\approx 60$  мг образца топлива. Приведенные числа относятся к серийной киносъемочной аппаратуре типа СКС-1М.

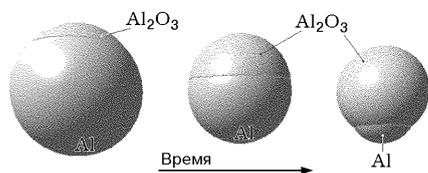


Рис. 2. Идеализованная картина трансформации индивидуального агломерата, погашенного на разных стадиях выгорания: количество металла в агломерате убывает, а доля поверхности, занятая оксидной нащепкой, растет

ных при горении под давлением 44 атм в опытах с длиной охранной трубки  $L = 3$  см. Содержание металлического алюминия в среднем по фракции составляло 29 %. Изображение получено с использованием импульсной рентгеновской трубки ИМА-5 (рабочее напряжение 100 кВ) [22] и пленки РТ-1. Частицы помещали на горизонтально расположенную пленку и облучали сверху, масштаб съемки 1:1, пространственное разрешение  $\approx 40$  мкм (лимитируется структурой светочувствительного слоя пленки). Топливо изготовлено на основе изопренового связующего (15 %), ПХА (37 % крупного + 27 % мелкого), алюминия (18 %) и катализатора (3 %). Подробности о топливе и проведении экспериментов можно найти в [23].

Следует добавить, что гранулометрический анализ существенно полидисперсных ансамблей частиц сам по себе представляет известные трудности [24]. Обычный способ их преодоления при анализе конденсированных продуктов горения — физическое фракционирование частиц с последующим расчетным объединением функций распределения, определенных для каждой из фракций.

**2. Особенности эволюции массового распределения агломератов при выгорании.** На рис. 2 представлена идеализованная картина трансформации структуры индивидуального агломерата, погашенного на разных стадиях выгорания. В реальности мы не имеем возможности следить за индивидуальными частицами, а в каждой из размерных фракций имеются частицы всех видов, изображенных на рис. 2. Принципиальное отличие процесса горения алюминийсодержащей частицы от горения углеродной или углеводородной состоит в накоплении конденсированного оксида на поверхности горячей частицы. Соотношение массы оксида, уходящего во внешний поток в виде мелкодисперсного «дыма», и оксида, накапливаемого на части-

це, — один из ключевых вопросов моделирования горения алюминийсодержащих частиц [25], поскольку допускает экспериментальную проверку выводов теории. Вследствие присоединения некоторой массы оксида к массе агломерата в общем случае неочевидна даже тенденция изменения массы горящего агломерата — увеличивается она со временем, или уменьшается, или с какого-то момента времени перестает изменяться из-за прекращения горения вследствие капсуляции металла под слоем оксида. До какой степени может выгореть металл агломерата за достаточно длительное время и во что превращается агломерат после полного выгорания — на эти простые вопросы, к сожалению, нет однозначных ответов. Экспериментальная информация о доле оксида, остающегося на частице, весьма ограничена и относится к одиночным частицам алюминия, сжигаемым в условиях невесомости [26].

Согласно данным [2] при горении алюминизированных топлив наблюдается тенденция увеличения количества белых оксидных сфер среди отобранных частиц конденсированных продуктов при изменении условий горения в направлении, способствующем выгоранию металла (повышение давления, увеличение времени пребывания частиц в высокотемпературных продуктах горения). Можно предполагать, что из некоторого количества агломератов алюминий выгорел полностью, и оксидная оболочка-нащепка стянулась в сферу, а другие агломераты погасли с остаточным содержанием алюминия. Экспериментально наблюдается снижение скорости потребления металлического алюминия из совокупности агломератов с течением времени. Высокая начальная скорость расходования алюминия обусловлена, предположительно, выгоранием мелких агломератов и неагломерировавших частиц, а падение скорости горения агломератов, особенно на расстоянии более 10 см от поверхности горения связано с ростом оксидной шляпки, делающей часть поверхности частицы недоступной для окисления [2].

Таким образом, агломераты полидисперсны и отличаются по структуре. Соответственно, параметры их движения и времена пребывания в высокотемпературных продуктах горения до гашения также различны, что еще более затрудняет сравнительный анализ массовых распределений агломератов по размерам, отобранных при вариации длины охранной трубки.

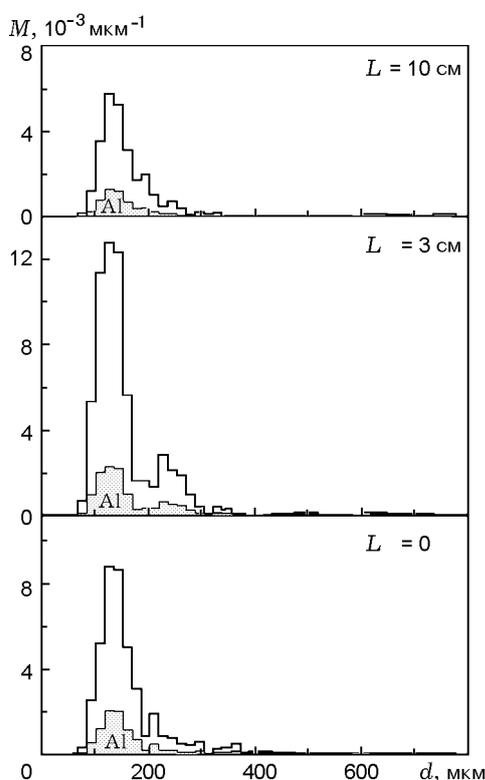


Рис. 3. Массовые распределения агломератов и металлического алюминия в агломератах при увеличении длины охранной трубки  $L$ :

$M$  — относительная масса

В качестве примера на рис. 3 представлены массовые распределения агломератов и металлического алюминия в агломератах при вариации длины охранной трубки  $L$ . Заметим, что приведенные кривые имеют отношение только к агломератам, т. е. к частицам диаметром  $d > 60$  мкм и являются фрагментами полных распределений. Оксидные частицы с  $d < 60$  мкм, составляющие значительную долю массы отобранных конденсированных продуктов горения, здесь не рассматриваются. В соответствии с методикой [5] отобранные частицы вначале разделяют на фракции, затем для каждой фракции проводят гранулометрический и химический анализы. Относительная масса агломератов определяется как

частное от деления массы в гистограммном интервале на массу топлива и на ширину размерного интервала. Относительная масса алюминия в агломератах в каждом гистограммном интервале вычисляется путем умножения относительной массы агломератов в этом интервале на массовую долю алюминия в агломератах. Массовая доля алюминия в конкретном интервале соответствует значению, полученному для той фракции, в которую попадает рассматриваемый интервал. В таком представлении гистограммные кривые суть функции плотности распределения относительной массы по размерам и объединяют результаты гранулометрического и химического анализов. Площадь под верхней кривой пропорциональна массе агломератов, а заштрихованная область под нижней кривой пропорциональна интегральной массе металлического алюминия в агломератах. Приведенные на рис. 3 распределения получены в [23] при сжигании топлива на основе энергетического связующего (30 %), ПХА (37 % крупного + 15 % мелкого) и алюминия (18 %) под давлением 22 атм. Энергетическое связующее представляло собой бутадиенитрильный каучук, пластифицированный диэтиленгликольдинитратом. Средние размеры агломератов  $D_{mn}$ , вычисленные в диапазоне  $60 \div 600$  мкм, представлены в таблице. При проведении гранулометрического анализа под микроскопом погрешность измерения диаметра частиц в диапазоне  $d = 100 \div 280$  мкм составляла  $\pm 9$  мкм. Для данных, представленных на рис. 3 и в таблице, трудно говорить о какой-либо выраженной эволюции распределений при увеличении длины трубки. В общем случае многообразие процессов, протекающих при эволюции агломератов во времени, может вызывать сложную трансформацию массовых функций распределения и немонотонное изменение средних размеров  $D_{10}-D_{53}$  при увеличении длины трубки. В любом случае извлечение из экспериментальных данных закона горения индивидуального агломерата в виде зависимости его размера или массы от времени весьма затруднительно и практически невозможно.

Альтернативный макрокинетический подход [5] состоит в обработке результатов отборов в виде зависимости неполноты сгорания агломератов алюминия от времени:  $\eta(t) = (\text{интегральная масса алюминия в агломератах}) / (\text{масса алюминия в топливе})$ , где  $t$  — время пребывания частиц, вычисленное

$L$ , см	$D_{mn}$ , мкм						
	$D_{10}$	$D_{20}$	$D_{30}$	$D_{21}$	$D_{32}$	$D_{43}$	$D_{53}$
0	124	129	133	133	142	156	165
3	120	124	128	127	138	152	161
10	127	131	135	135	144	155	162

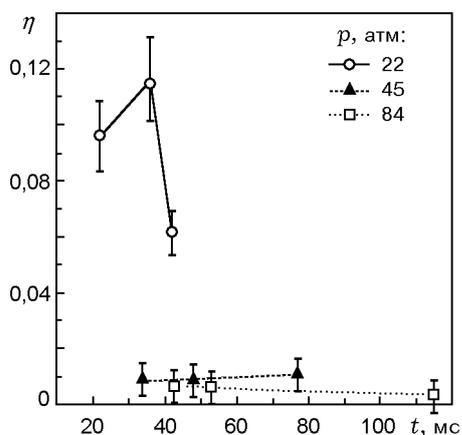


Рис. 4. Зависимость неполноты сгорания алюминия от времени при вариации давления и длины охранной трубки  $L$ :

выраженная немонокотонность наблюдается при  $p = 22$  атм

для некоторого характерного размера. В качестве такого размера можно брать, например, какой-либо средний размер или размер частиц с максимальным содержанием алюминия при нулевой длине охранной трубки. Зависимость  $\eta(t)$  обычно удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией  $\eta(t) = A \exp(-Bt)$ .

На практике оказалось, что в некоторых (достаточно редких) случаях точки располагаются так, что зависимость  $\eta(t)$  немонотонна настолько, что такое ее поведение не может быть следствием только разброса экспериментальных данных. Заметим, что именно разброс результатов определения величины  $\eta$  при повторении серий экспериментов в одних и тех же условиях следует использовать для оценки погрешности и доверительного интервала, поскольку неопределенность в количестве алюминия в агломератах, обусловленная погрешностями проведения химического анализа, значительно меньше, чем разброс данных от серии к серии.

На рис. 4 приведены зависимости  $\eta(t)$ , полученные в [23] для вышеупомянутого топлива на основе энергетического связующего. Изменение времени пребывания частиц в пламени топлива обеспечивалось вариацией длины охранной трубки ( $L = 0; 3$  и  $10$  см). Расположение точек в случае давления  $p = 22$  атм демонстрирует аномальное поведение зависимости  $\eta(t)$ . Безусловно, неопределенность в расчете времени оказывает влияние на вид зависимости  $\eta(t)$ , однако в данном случае анома-

лия связана с тем, что более полное сгорание металлического алюминия реализуется в экспериментах с меньшей длиной охранной трубки ( $\eta|_{L=0} < \eta|_{L=3 \text{ см}}$ ).

Одна из возможных причин немонотонного поведения экспериментальной зависимости  $\eta(L)$  — неконтролируемое влияние охранной трубки на движение частиц и параметры газа внутри трубки. Движение частиц осложнено формированием пограничного слоя вблизи стенки трубки, а также наличием профиля скорости газа по сечению трубки. Характеристики газового потока внутри трубки изменяются в результате теплового и физико-химического взаимодействия с материалом трубки. Следует ожидать как понижения температуры газообразных продуктов горения вследствие затрат тепла на нагрев стенок трубки, так и снижения окислительного потенциала из-за реагирования продуктов горения с материалом трубки<sup>2</sup>. В результате закономерности выгорания частиц могут изменяться по мере движения вдоль трубки. При этом влияние длины трубки на экспериментально определяемую макрокINETическую величину  $\eta$  не может быть сведено только к вариации времени реагирования частиц до замораживания. Иначе говоря, применение трубки той ли иной длины несколько модифицирует параметры зависимости неполноты сгорания от дистанции замораживания ( $R$ ), которая складывается из длины охранной трубки и некоторого характерного расстояния от среза трубки до местоположения замораживания частиц. Заметим, что в экспериментах без трубки ее роль играют стенки стаканчика, так что за время горения образца происходит как бы эффективное увеличение длины трубки от нуля до величины, равной глубине стаканчика. Даже если характер смещения продуктов горения топливного образца с инертным газом не зависит от длины трубки, т. е. при неизменных условиях эксперимента гашение частиц происходит на одном и том же расстоянии от среза трубки, появления немонотонности можно ожидать, если допустить, что выгорание частиц в длинной трубке «в среднем» протекает несколько медленнее, чем в ко-

<sup>2</sup> Авторами были опробованы трубки из оргстекла, фторопласта и кварца, и предпочтение отдано оргстеклу. На стенки кварцевой трубки происходит интенсивное осаждение частиц. Фторопласт по сравнению с оргстеклом при прочих равных условиях теряет большую массу при воздействии продуктов горения, что, вероятно, вносит большие искажения в состав газовой среды.

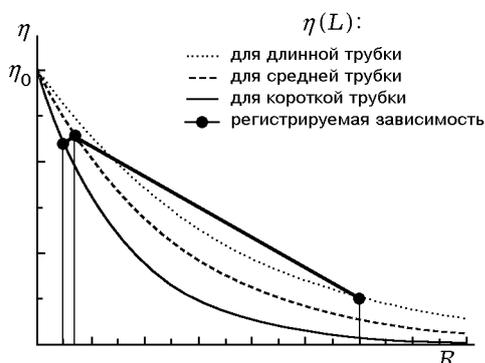


Рис. 5. Гипотетическое объяснение возникновения немонотонной зависимости непереносимости сгорания алюминия агломератов от дистанции замораживания:

если для каждой охранной трубки реализуется индивидуальная зависимость  $\eta_0(L)$  (экспоненциально спадающие кривые), то, прерывая горение на разных стадиях (вертикальные линии), можно получить ситуацию, когда увеличение длины трубки не будет сопровождаться более полным сгоранием алюминия (жирная ломаная линия)

роткой, вследствие причин, названных выше. Рис. 5 иллюстрирует данное утверждение. Если в каждом случае частицы начинают свою эволюцию в газовой фазе с некоторого значения непереносимости сгорания  $\eta = \eta_0$ , а их дальнейшее состояние описывается одной из кривых, соответствующих разным охранным трубкам, то, прерывая процесс горения на разных стадиях путем вариации дистанции замораживания, можно столкнуться с ситуацией, когда в опытах со средней трубкой будут отобраны частицы с большим недогоранием алюминия, чем в опытах с короткой трубкой. При этом наблюдаемая зависимость  $\eta$  от дистанции замораживания и/или от длины трубки будет немонотонной (см. рис. 5).

Для экспериментально-расчетной зависимости  $\eta(t)$  ( $\eta$  определяется из эксперимента,  $t$  вычисляется) положение усугубляется грубыми упрощениями, сделанными при вычислении времени реагирования из-за отсутствия объективной информации о закономерностях физико-химического взаимодействия двухфазного высокотемпературного потока с материалом стенок охранной трубки и замораживающим газом, о движении горячей частицы и т. д. Перечислим эти допущения.

(а) Установившийся (стационарный) характер течения газа в трубке и неизменность тепловой и гидродинамической картины за вре-

мя горения образца.

(б) Игнорирование сложной гидродинамической картины течения двухфазного потока продуктов горения внутри охранной трубки и смешения продуктов горения и замораживающего газа после выхода из трубки, задание поверхности замораживания в виде плоскости вместо определения ее истинной формы из эксперимента.

(в) Замена реального полидисперсного ансамбля частиц, обладающего скоростной неравновесностью, монодисперсной совокупностью с эффективным размером.

(г) Одномерное описание течения газа у поверхности топлива без учета струйного характера оттока продуктов от поверхности горения.

(д) Использование простейшего выражения для коэффициента сопротивления частиц в потоке газа.

Аспекты (г), (д) будут подробно рассмотрены в следующем параграфе.

В заключение отметим, что изучение эволюции агломератов в факеле горящего топлива методом отборов возможно в ограниченном временном диапазоне. Для типичных (по скорости горения и размеру образуемых агломератов) топлив его можно оценить в  $5 \div 100$  мс. Уменьшить время можно только приблизив отборник к поверхности, что неминуемо внесет возмущения в процесс горения. Увеличение времени пребывания, например, путем использования охранной трубки большой длины, приведет к искажению параметров газового потока. Поэтому следующие вопросы все еще ждут своего решения: что происходит с агломератами на самой ранней стадии горения и какова глубина выгорания металла в момент отрыва агломерата от поверхности горения; что представляют собой агломераты в конце эволюции и возможно ли полное выгорание алюминия из агломератов?

Заметим также, что глубокое выгорание алюминия в реальном двигателе может быть обусловлено, по-видимому, не только адиабатичностью процесса, но и разрушением горящих агломератов в результате взаимодействия с газовым потоком с последующим ускоренным выгоранием их фрагментов.

**3. Закономерности движения горящих агломератов.** Выше было показано, что даже для агломератов заданного размера характерны разброс в структуре (плотности) и неопределен-

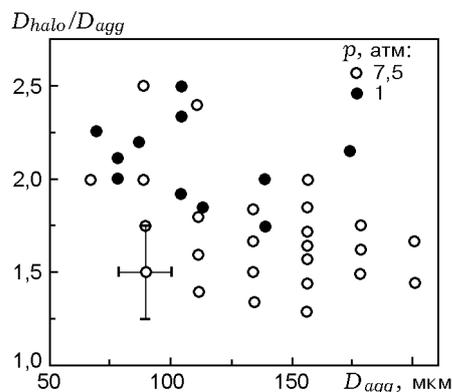


Рис. 6. Относительный размер ореола, окружающего горящий агломерат при вариации давления

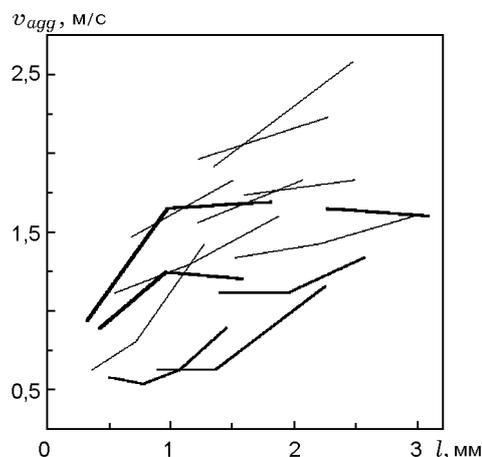


Рис. 7. Скорость движения индивидуальных агломератов при удалении от поверхности горения

ность в динамике массообмена при выгорании. К сожалению, трудности описания движения агломератов этим не исчерпываются.

Прежде всего, применение классического закона Стокса для расчета сопротивления частиц, увлекаемых газовым потоком, в данном случае не совсем корректно. Закон Стокса получен для изотермического обтекания сферы при числах Рейнольдса  $Re < 1$  [27], в то время как при типичных скоростях горения и размерах частиц числа  $Re$  варьируются в диапазоне  $5 \div 500$ . Использование закона Стокса обычно оправдывают возможностью аналитического решения задачи о движении частиц [5], хотя известно аналитическое решение этой задачи для более сложного вида закона сопротивления частиц [28].

Далее, пока неясно, как влияет горение агломерата на его взаимодействие с газовым потоком. Например, в [29] указано, что это взаимодействие вообще не может быть рассчитано с помощью обычного закона сопротивления при постоянной плотности агломератов. Имеются основания предполагать, что сопротивление горящих частиц зависит не от диаметра частицы, а определяется некоторым эффективным диаметром, возможно совпадающим с диаметром светящейся зоны или ореола, окружающего горящую частицу или агломерат. Для учета этого обстоятельства при расчете движения, например в [30], после воспламенения агломерата коэффициент сопротивления увеличивали в 2,5 раза.

Размер ореола, как известно, зависит от природы топлива, давления, размера частицы, интенсивности испарения металла и ряда дру-

гих факторов [31, 23]. На рис. 6 представлены экспериментальные данные об относительном размере ореола  $D_{halo}/D_{agg}$ , где  $D_{halo}$  — видимый размер ореола, а  $D_{agg}$  — диаметр агломерата. Данные получены в результате обработки киноплёнок скоростной киносъёмки приповерхностной зоны горящего топлива на основе энергетического связующего [23]. Видно, что повышение давления приводит к уменьшению размера ореола.

Интенсивность горения агломерата, очевидно, зависит от его индивидуальных особенностей, в частности от размера оксидной наплески. По-видимому, следует ожидать также нестационарных эффектов «разгорания» частиц в начальной стадии горения, приводящих к трансформации ореола и течения газа в окрестности частицы.

Кроме того, существует неопределенность в параметрах газового потока, обусловленная гетерогенной структурой топлива. Вблизи поверхности горения имеются струйки тока, значительно отличающиеся по температуре и составу газа [32]. Характерные размеры струек тока и время их существования связаны со скоростью горения и масштабом гетерогенности, зависящим от гранулометрического состава исходных компонентов топлива. В результате горящие агломераты вблизи поверхности горения движутся вовсе не в одномерном газовом потоке, как обычно предполагается в математических моделях, и характер их движения далек от идеального. На рис. 7 представлены результаты обработки плёнок скоростной киносъёмки приповерхностной зоны топлива на осно-

ве энергетического связующего из [23] в виде зависимости скорости движения индивидуальных агломератов ( $v_{agg}$ ) от расстояния от поверхности горения ( $l$ ). Визуализация проведена при  $p = 7,5$  атм. Наряду с нормально ускоряющимися агломератами, наблюдаются агломераты с деградацией ускорения и потерей скорости. Данный факт можно объяснить выпадением частиц из струек тока или прекращением действия самих струек тока. Заметим, что кривые на рис. 7 соответствуют только некоторым из зарегистрированных траекторий частиц, поэтому по нему не следует судить о числовом соотношении нормальных и аномальных траекторий.

Наконец, последний вопрос, который также пока не имеет ответа: какова начальная скорость частиц сразу после отрыва от поверхности горения? Легко представить ситуацию, что агломерат выбрасывается в поток в результате ускоренной газификации некоторой порции топлива, расположенной непосредственно под ним, а уже затем начинает свое движение под действием силы Стокса. Даже скоростная теневая киносъемка, как правило, не позволяет увидеть старт частицы из-за рельефности поверхности горения. Из обработки изображений одной частицы на последовательных кадрах можно только заключить, что если частицы и имеют некоторую стартовую скорость, обусловленную отличным от стоксовского механизмом разгона, то значения этой скорости не превышают десятков сантиметров в секунду, что, впрочем, уже существенно для корректного описания движения частиц у поверхности горения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании изложенного можно заключить, что большинство проблем, возникающих при интерпретации экспериментальных результатов, полученных при изучении агломерации и эволюции агломератов методом отборов, так или иначе связаны с полидисперсностью агломератов и особенностями их горения и движения. Из-за отсутствия информации о множестве процессов, имеющих место при проведении экспериментов в реальной установке, в первую очередь о гидродинамической картине течения двухфазного потока продуктов горения и о динамике замораживания частиц, исследователи вынуждены чрезмерно упрощать математическую обработку полученных дан-

ных, например, игнорируя особенности движения частиц, описывая полидисперсную систему эффективным размером и т. д. В то же время, упрощенная обработка данных препятствует получению достоверной информации о процессе эволюции агломератов.

Представляется, что этот замкнутый круг можно разорвать путем усовершенствования обработки данных на основе математического моделирования процессов в реальной установке, одновременно уменьшая неопределенность в экспериментальных условиях с целью приближения их к модельным.

Так, применительно к нашей методике с замораживанием частиц в спутном потоке инертного газа планируется создание совокупности процедур и программ, основанных на численном решении двумерной задачи о движении газа и частиц в реальной геометрии бомбы, используемой для отбора частиц. После наполнения модели взятыми из эксперимента параметрами планируется:

- сформулировать критерий гашения частиц и корректно выбрать «поверхность замораживания», т. е. локализовать местоположение гашения частиц;
- на основе расчетов времен пребывания (времени движения до поверхности замораживания) для частиц, стартующих из произвольной точки в объеме топливного образца, сформулировать алгоритм осреднения времен пребывания со статистическим весом, пропорциональным массе частиц, имеющих одинаковое время пребывания.

Для уменьшения неопределенности в экспериментальных условиях предлагается использовать специальное модельное топливо, генерирующие монодисперсные агломераты фиксированной структуры, приближенной к реальной.

Идея создания такого топлива, названного «супергетерогенным», сформулирована и впервые реализована в 1989 г. нашим коллегой, сотрудником лаборатории горения конденсированных систем В. М. Болваненко. Суть ее состоит в следующем. Вначале изготавливается высокометаллизированное топливо с компонентным составом, соответствующим локальному составу реального топлива в объеме между частицами крупного окислителя, т. е. мо-

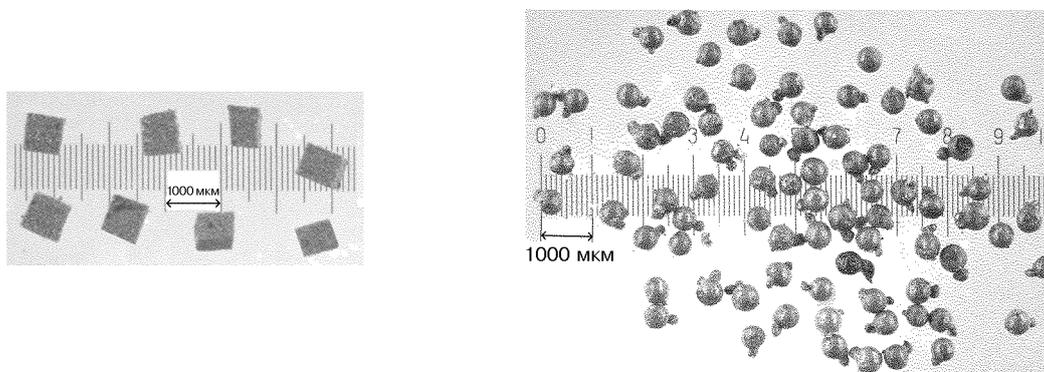


Рис. 8. Гетерогенные включения кубической формы (слева) и модельные агломераты после гашения и отбора (справа):

в волне горения каждый кубик-включение превращается в агломерат

делирующее состав карманов. Затем из топлива вырезают мелкие кусочки одинакового размера, которые вводят в безметалльную гомогенизированную матрицу, оптимизированную для достижения максимальной температуры горения. При горении такого топлива каждый кусочек-включение в волне горения превращается в агломерат, размер и структура которого predeterminedены составом гетерогенного топлива и размером вложенных кусочков (рис. 8). Наличие окислителя в составе включений обеспечивает воспламенение «суперагломератов» на поверхности горения. Использование мелкодисперсных порошковых компонентов при изготовлении безметалльного состава-матрицы позволяет сделать поток оттекающих газообразных продуктов однородным по поверхности горения.

Таким образом, эксперименты с супергетерогенным топливом могут позволить избавиться от проблем, порождаемых полидисперсностью агломератов и различиями в их структуре, а также от проблем, обусловленных струйным характером оттекания газообразных продуктов от поверхности горения.

В настоящее время начаты эксперименты с таким топливом. Закономерности движения горящих агломератов изучаются посредством визуализации области вблизи поверхности топлива с использованием видеосъемки через диск-обтюратор при атмосферном давлении. В результате визуализации мы надеемся выбрать наиболее подходящее выражение для коэффициента сопротивления. Эволюция горящих агломератов исследуется с использованием методики отборов в бомбе при вариации давления и длины охранной трубки. Из обработки

результатов отборов мы надеемся получить ответы на ряд принципиальных вопросов, в частности о динамике выгорания индивидуального агломерата и о доле оксида, накапливаемого на горячей частице. Очевидно, что такая информация может служить основой для интерпретации данных отборов реальных полидисперсных ансамблей частиц.

Работа выполнена при поддержке INTAS (грант 93-2560 ext).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов Н. Н., Иванов А. Н.** Приборы и установки контактной диагностики и их использование в исследовании высокотемпературных двухфазных потоков // *Физика горения и взрыва*. 1991. Т. 27, № 6. С. 87–101.
2. **Price E. W., Sigman R. K., Sambamurthi J. R., and Park C. J.** Behavior of aluminum in solid propellant combustion. AFOSR-TR-82-0964. Georgia Inst. of Technology, 1982. (Переводы ЦООНТИ: М-13176, 1985; М-13217, 1985).
3. **Гусаченко Е. И., Стесик Л. Н., Фурсов В. П., Шевцов В. И.** Исследование конденсированных продуктов горения магниевых порошков. I. Зависимость от давления // *Физика горения и взрыва*. 1974. Т. 10, № 4. С. 548–554; II. Зависимость от размера частиц // Там же. № 5. С. 869–876.
4. **Левашенко Г. И., Бахир Л. П.** Способ отбора частиц, образующихся при горении металлизированных конденсированных систем в камере постоянного давления // *Физика горения и взрыва*. 1973. Т. 9, № 2. С. 330–331.
5. **Глотов О. Г., Зырянов В. Я.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // *Физика горения и взрыва*. 1995. Т. 31, № 1. С. 74–80.

6. **Эйзель, Браун, Прайс.** Влияние давления, скорости и геометрии на размеры частиц  $Al_2O_3$ , образующихся при горении алюминизированного твердого топлива // Ракет. техника и космонавтика. 1975. Т. 13, № 7. С. 89–95.
7. **Федоров Б. Н., Плечов Ю. Л., Тимохин Э. М.** Исследование дисперсности частиц окиси алюминия в продуктах сгорания конденсированных веществ // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 1. С. 22–27.
8. **Самбамурти Дж. К., Прайс Е. В., Сигмен Р. К.** Агломерация алюминия при горении смесевых твердых ракетных топлив // Аэрокосм. техника. 1985. Т. 3, № 1. С. 65–81.
9. **Бабук В. А., Белов В. П., Шелухин Г. Г.** Особенности горения частиц алюминия в составе смесевых конденсированных систем при низких и высоких давлениях // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 26–31.
10. **Иванов Н. Н., Иванов А. Н.** Способ получения порошка оксидов // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 64–71.
11. **Барашков Н. М., Морозов А. П., Тененев В. А.** Поведение частиц, содержащих алюминий, в высокотемпературном потоке газа // Макроскопическая кинетика, химическая и магнитная газодинамика: Тез. докл. III Всесоюз. школы-семинара. Томск: Изд-во ТГУ, 1991. Ч. II. С. 107–108.
12. **Горение** порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. М.: Наука, 1972.
13. **Braithwaite P. C., Christensen W. N., and Daugherty V.** Quench bomb investigation of aluminum oxide formation from solid rocket propellants (pt I): Experimental methodology // 25th JANNAF Combustion Meeting, Huntsville, 1988. P. 175–184.
14. **Tai-Kang Liu, Huey-Cherng Perng, Song-Ping Luh, Fang Liu.** Aluminum Agglomeration in AP/RDX/Al/HTPB Propellant Combustion. AIAA Paper N 91-1870. 1991. P. 1–11.
15. **Суслов А. В., Дрейзин Э. Л., Трунов М. А.** Методика исследования кинетики окисления движущихся горящих металлических частиц // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 4. С. 138–139.
16. **Dreizin E. L.** Experimental study of stages in aluminum particle combustion in air // Combust. Flame. 1996. V. 105. P. 541–556.
17. **Покатило Н. А., Лисицына В. И., Никитина С. Ф.** К вопросу о выборе замораживающего хладагента при отборе конденсированных продуктов сгорания // Тр. МВТУ № 220. Вопросы двигателестроения. М.: 1978. Вып. 1. С. 17.
18. **Glotov O. G., Zyryanov V. Ya.** The effect of pressure on characteristics of condensed combustion products of aluminized solid propellants // Archivum Combustionis. 1991. V. 11, № 3–4. P. 251–262.
19. **Коэн Н. С.** Модель «карманов» для описания процесса агломерации алюминия в смесевых ракетных топливах // Аэрокосм. техника. 1984. Т. 2, № 2. С. 67–75.
20. **Николенко А. Н., Ковальченко М. С.** Анализ случайной упаковки идентичных частиц. IV. Зональное обособление в порошковых телах // Порошковая металлургия. 1986. № 2. С. 22–26.
21. **Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В., Шелухин Г. Г.** Исследование агломерации частиц алюминия при горении в составе смесевых конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 20–25.
22. **Быстров Ю. А., Иванов С. А.** Ускорительная техника и рентгеновские приборы. М.: Высш. шк., 1983.
23. **Glotov O. G., Zarko V. E., Karasev V. V., and Beckstead M. W.** Effect of binder on the formation and evolution of condensed combustion products of metalized solid propellants // Combustion and Detonation. 28th Intern. Annual Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany. 1997. Report 75.
24. **Градус Л. Я.** Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. М.: Химия, 1979.
25. **Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С.** Особенности горения частицы алюминия в потоке активных газов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 41–48.
26. **Zenin A., Kusnezov G., and Kolesnikov V.** Physics of Aluminum Particle Combustion at Zero-Gravity // AIAA Paper N 99-0696. 1999. P. 1–6.
27. **Основы** практической теории горения / Под ред. В. В. Померанцева. 2-е изд. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
28. **Putnam A.** Integratable form of droplet drag coefficient // ARS Journal. 1961. V. 31, N 10. P. 1467–1468.
29. **Брандидж В. Н., Кавени Л.** Медленногорящие алюминизированные топлива в поле перегрузок // Аэрокосм. техника. 1985. Т. 3, № 1. С. 47–58.
30. **Renie J. P. and Osborn J. P.** Combustion Modeling of Aluminized Propellants // AIAA Paper N 79-1131. 1979.
31. **Клячко Л. А.** Горение частицы легкокипящего металла, движущейся относительно окислителя // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 2. С. 236–241.
32. **Шелухин Г. Г., Булдаков В. Ф., Белов В. П.** Экспериментальное исследование процесса горения гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 1. С. 42–51.