

Н. Н. Иванов, А. Н. Иванов

ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ КОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

В настоящее время для исследования конденсированных продуктов сгорания энергетических установок ракетно-космических комплексов (РКК) применяются контактные и бесконтактные (в частности, оптические) методы диагностики. У всех методов имеются известные достоинства и недостатки. Отметим, что подавляющее количество значимых результатов измерений характеристик дисперсной фазы в истории исследования высокотемпературных продуктов сгорания РКК получено с помощью контактных методов диагностики.

В ряде публикаций (см., например, [1—3]), посвященных оптическим методам измерения двухфазных потоков, высказана мысль, что «современным требованиям получения информации о параметрах потоков могут удовлетворить только бесконтактные методы, среди которых следует выделить оптические методы» [2].

Такая точка зрения не представляется убедительной и аргументированной в настоящее время. Дело в том, что, например затвердевшие конденсированные продукты сгорания современных металлизированных составов часто имеют асимметричную форму, складчатую морфологию с подпутрением, объемы с пустотами, а также сложную и малоизученную в настоящее время химическую и физическую природу (рис. 1). Именно эти параметры k -фазы оптическими методами определяются с трудом или не определяются вовсе. Далее, именно форма и химический состав конденсированных продуктов сгорания обуславливают важную, но малоизвестную при оптических измерениях величину комплексного показателя преломления частиц $m = n - ik$ (n и k — показатели преломления и поглощения конденсированных частиц соответственно). В работе [4] сообщается о возникновении аэрозольных частиц из газа во время зондирования газового потока лучом лазера. Отмечается, что образование частиц из газа под воздействием лазерного излучения происходит в два этапа: сначала излучение вызывает химические процессы в газе, а затем из одного или нескольких продуктов реакций образуются частицы. Зарегистрировано, что предельный размер таких частиц достигает 1—3 мкм. Не возникают ли новые кластеры и конденсированные частицы в двухфазных продуктах сгорания энергетических установок во время зондирования последних лазерным излучением? Еще один вопрос, требующий ответа. В ряде работ, например в [5], отмечаются и такие недостатки, свойственные оптическим методам измерения, как значительная методическая погрешность, низкая помехоустойчивость и надежность устройств, а также сложность их использования в промышленных условиях.

В связи с изложенным более правильным представляется использовать для диагностики высокотемпературных двухфазных потоков комбинации контактных и бесконтактных (в частности, оптических) методов измерения, взаимодополняющих, а не конкурирующих друг с другом. Такие комбинации, как будет показано далее, в практике измерения двухфазных потоков уже применяются.

Цель настоящего обзора — собрать, систематизировать и проанализировать разрозненные публикации по контактной диагностике высокотемпературных двухфазных потоков. Это представляется целесообразным по двум причинам. Во-первых, такой обзор может быть полезным в качестве справочного материала для инженеров и научных сотрудников, занимающихся вопросами контактной диагностики высокотемпературных двухфазных потоков. Во-вторых, он может служить пособием для аспирантов и начинающих специалистов. Естественно, об-

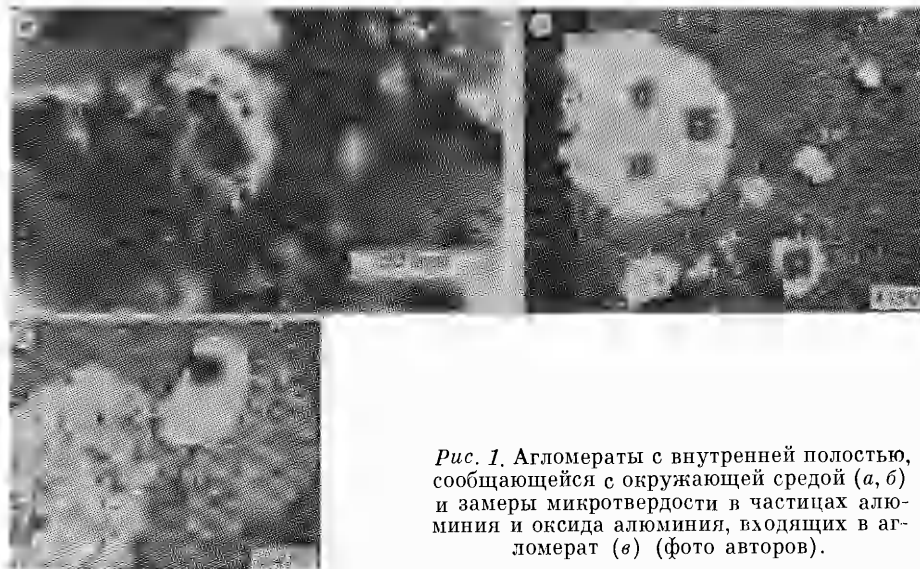


Рис. 1. Агломераты с внутренней полостью, сообщающейся с окружающей средой (а, б) и замеры микротвердости в частицах алюминия и оксида алюминия, входящих в агломерат (в) (фото авторов).

зор не претендует на полноту охвата и освещение всех современных аспектов контактной диагностики высокотемпературных двухфазных потоков.

Область исследования

Известно, что любая двухфазная система состоит из непрерывной (сплошной) среды и дискретной фазы. В энергетических установках РЖК — это соответственно газообразные продукты сгорания и жидкие капли (камера сгорания) или жидкие и твердые частицы (сопло). Диапазон размеров капель и частиц дискретной фазы, образующихся при горении металлизированных составов в энергетической установке, очень широк — от сотых долей до сотен микрометров, а массовый расход этой фазы может составлять десятки процентов (свыше 40 %) общего расхода продуктов сгорания металлизированных составов.

Основная характеристика любой полидисперсной системы — интегральная функция распределения $\Phi_y(d_s)$ — показывает долю какого-либо параметра системы, приходящуюся на частицы с размером меньшим, чем данный размер, относительно величины этого же параметра для всей системы. В качестве такого параметра может быть выбрано число частиц, их объем, поверхность, масса и т. д. Индекс y показывает, какой именно это параметр; d_s — диаметр частицы.

Наряду с интегральной функцией распределения используется и дифференциальная функция распределения или плотность распределения вероятности. Эта функция имеет вид: $F_y(d_s) = \frac{d\Phi_y(d_s)}{dd_s}$. Обычно функция $F_y(d_s)$ нормируется на единицу. Отсюда любую среднюю величину \bar{a}_y можно получить следующим образом:

$$\bar{a}_y = \int_0^{\infty} a_y(d_s) F_y(d_s) dd_s.$$

На практике обычно принимают

$$F_y(d_s) = n(d_s)/N,$$

где N — полное число частиц.

В отечественной и зарубежной литературе для анализа и сравнения интегральных импульсно-энергетических характеристик полидисперсных двухфазных течений в соплах и камерах сгорания РЖК часто

используются средние диаметры частиц $(d_s)_{mn}$, рассчитанные по эмпирическим распределениям $f(d_s)$: среднеарифметический $(d_s)_{10}$, среднеквадратичный $(d_s)_{20}$, среднекубический $(d_s)_{30}$, средний объемно-поверхностный $(d_s)_{32}$, среднемассовый $(d_s)_{43}$, средний $(d_s)_{53}$ и т. д. Вычисляются все эти диаметры по формуле

$$(d_s)_{mn} = \left[\frac{\int_{(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} d_s^m \cdot f(d_s) dd_s}{\int_{(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} d_s^n \cdot f(d_s) dd_s} \right]^{\frac{1}{m-n}}$$

Здесь $f(d_s)$ — эмпирическое распределение конденсированных продуктов сгорания по размерам: $(d_s)_{\min}$ и $(d_s)_{\max}$ — минимальный и максимальный диаметр конденсированных продуктов сгорания в экспериментальной пробе.

При контактной диагностике РКК весьма важен вопрос о дисперсионном анализе полидисперсной совокупности (или ансамбля) затвердевших конденсированных продуктов сгорания металлизированных составов. Наиболее объективной представляется разработанная в ОИХФ АН СССР [6] методика, включающая предварительное разделение исследуемой навески частиц на несколько (обычно 3—4) фракций. Предварительное разделение навески к-фазы на несколько фракций позволяет в дальнейшем с высокой точностью измерить дисперсность частиц в каждой фракции с помощью оптической и электронной микроскопии. Зная массовые доли каждой фракции, нетрудно математически восстановить полный спектр размеров частиц всей навески.

Без подобного разделения информация требуемой точности о полном спектре размеров частиц не может быть получена из-за слишком широкого размаха спектра размеров частиц — от 0,01 до 100 мкм и более.

Отдельные вопросы приготовления навески (или пробы) конденсированных продуктов сгорания, их последующее препарирование и обсчет рассматривались, например, в [7—8]. Однако в этих публикациях отсутствует описание важной для практики методики восстановления разделенного на отдельные фракции спектра распределения конденсированных частиц по размерам или массе. В связи с этим целесообразно описать эту методику восстановления, например, по массе. Полагаем, что все частицы сплошные и состоят из вещества с плотностью ρ_s .

Пусть масса анализируемой пробы равна M_s . Разделим пробу методом седиментации на k фракций, тогда массы разделенных фракций будут равны соответственно $M_{s1}, M_{s2}, \dots, M_{sk}$, т. е. массовые доли этих разделенных фракций в отобранной пробе составляют $\alpha_1 = M_{s1}/M_s, \alpha_2 = M_{s2}/M_s, \dots, \alpha_k = M_{sk}/M_s$. Восстановленная массовая доля конденсированных продуктов сгорания Δg_s^i в i -м интервале размеров частиц от d_s до $d_s + \Delta d_s$ может быть определена по формуле

$$\Delta g_s^i = M_s^i/M_s = \alpha_1 (\Delta g_s^i)_1 + \alpha_2 (\Delta g_s^i)_2 + \dots + \alpha_k (\Delta g_s^i)_k,$$

$$(\Delta g_s^i)_1 = (M_s^i)_1/M_{s1}, (\Delta g_s^i)_2 = (M_s^i)_2/M_{s2}, \dots, (\Delta g_s^i)_k = (M_s^i)_k/M_{sk}.$$

Нормированное значение функции плотности распределения массы конденсированных продуктов сгорания в i -м интервале размеров частиц от d_s до $d_s + \Delta d_s$ вычисляется следующим образом:

$$\frac{dG_s^i}{dd_s} = \lim_{\Delta d_s \rightarrow 0} \frac{\Delta G_s^i}{\Delta d_s} \approx \alpha_1 \frac{(\Delta g_s^i)_1}{\Delta d_s} + \alpha_2 \frac{(\Delta g_s^i)_2}{\Delta d_s} + \dots + \alpha_k \frac{(\Delta g_s^i)_k}{\Delta d_s}.$$

Нормированная интегральная функция распределения массы конденсированных продуктов сгорания для рассматриваемой исходной навески

определится соотношением

$$G_s(d_s) = \int_{(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} (dG_s^i/dd_s) dd_s \simeq \sum_{(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} (\Delta G_s^i/\Delta d_s) \Delta d_s.$$

В оптической и электронной микроскопии имеют дело с затвердевшими конденсированными частицами. Если необходимо перейти от диаметра затвердевшей к диаметру жидкой частицы, пересчет следует сделать по формуле

$$(d_s^i)_{\text{ж}} = \frac{(d_s^i)_{\text{т}}}{\sqrt[3]{\rho_{\text{ж}}(T)/\rho_{\text{т}}}},$$

где $(d_s^i)_{\text{ж}}$, $(d_s^i)_{\text{т}}$ и $\rho_{\text{ж}}(T)$, $\rho_{\text{т}}$ — диаметры и плотности жидкой и твердой конденсированной частицы соответственно.

Иногда требуется знать число конденсированных частиц $\bar{N}_i(d_s^i)$ того или иного размера от d_s^i до $d_s^i + \Delta d_s$ в единице массы отобранной в эксперименте пробы. Представим вывод этого полезного для практики соотношения:

$$\bar{N}_i(d_s^i) = N_i(d_s^i)/M_s [1/\text{мг}].$$

В случае разделения отобранной пробы на k фракций, когда частицы с этими размерами оказались в различных разделенных фракциях, можно записать

$$\bar{N}_i(d_s^i) = \frac{N_1^{\Phi}(d_s^i) + N_2^{\Phi}(d_s^i) + \dots + N_k^{\Phi}(d_s^i)}{M_s},$$

где M_s — масса отобранной пробы конденсированных продуктов сгорания, подготовленных к анализу.

После приготовления из разделенных фракций k выборок и обсчета их с помощью электронного и оптического микроскопов можно определить k массовых соотношений между обсчитанными выборками и соответствующими разделенными фракциями по формуле

$$\xi_i = \frac{\sum_{i=(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} N_i^{\text{в}}(d_s^i) m_i}{M_{s_i}} \ll 1,$$

где $N_i^{\text{в}}(d_s^i)$ — обсчитанное число частиц размером от d_s^i до $d_s^i + \Delta d_s$ в i -й выборке.

Предполагая, как и прежде, что в разделенных фракциях и в обсчитанных выборках сохраняется один и тот же закон распределения конденсированных частиц по размерам, можно написать

$$N_i^{\Phi}(d_s^i) = \frac{N_i^{\text{в}}(d_s^i)}{\xi_i}.$$

Подставляя полученные значения $N_i^{\Phi}(d_s^i)$ в исходное соотношение для $\bar{N}_i(d_s^i)$, окончательно имеем

$$\bar{N}_i(d_s^i) = \frac{N_i^{\text{в}1}(d_s^i)/\xi_{i1} + N_i^{\text{в}2}(d_s^i)/\xi_{i2} + \dots + N_i^{\text{в}k}(d_s^i)/\xi_{ik}}{M_s}$$

или

$$\begin{aligned} \bar{N}_i(d_s^i) &= \\ &= \frac{\frac{N_i^{\text{в}1}(d_s^i) M_{s1}}{\sum_{i=(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} N_i^{\text{в}1}(d_s^i) m_i} + \frac{N_i^{\text{в}2}(d_s^i) M_{s2}}{\sum_{i=(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} N_i^{\text{в}2}(d_s^i) m_i} + \dots + \frac{N_i^{\text{в}k}(d_s^i) M_{sk}}{\sum_{i=(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} N_i^{\text{в}k}(d_s^i) m_i}}{M_s} = \end{aligned}$$

$$= \frac{N_i^{B1}(d_s^i) \alpha_1}{\sum_{i=(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} N_i^{B1}(d_s^i) m_i} + \frac{N_i^{B2}(d_s^i) \alpha_2}{\sum_{i=(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} N_i^{B2}(d_s^i) m_i} + \dots + \frac{N_i^{Bk}(d_s^i) \alpha_k}{\sum_{i=(d_s)_{\min}}^{(d_s)_{\max}} N_i^{Bk}(d_s^i) m_i}.$$

В заключение данного раздела обзора несколько слов о воспроизводимости и точности результатов измерения дисперсных систем. Известно, что наиболее важной и ответственной характеристикой любого метода измерения является воспроизводимость и точность полученных результатов. Особенно остро стоит этот вопрос в методах оценки точности для многопараметрических систем (в том числе и дисперсных), так как в этом случае возникают вопросы о воспроизводимости как средних величин, характеризующих тот или иной спектр, так и точности формы спектра.

Если какой-либо из средних диаметров (моментов) воспроизводится с высокой точностью, это еще совсем не означает, что форма спектра воспроизводится с такой же точностью, ибо в принципе совершенно разные по форме спектры распределения частиц по размерам могут иметь равные отдельные средние диаметры, а остальные могут существенно различаться. Например, если совпадают только средне-объемные диаметры частиц $(d_s)_{30}$, то значит в единице массы (при равной плотности частиц) всегда находится одно и то же количество частиц. Поэтому для оценки воспроизводимости формы спектра необходимо сравнивать несколько моментов, отличающихся по своему физическому смыслу. В общем случае при абсолютном воспроизведении формы спектра должны совпадать моменты всех порядков. В практике дисперсионного анализа конденсированных продуктов, образующихся при горении металлизированных составов, хорошая воспроизводимость спектров может считаться достигнутой, если совпадают момент от $(d_s)_{10}$ до $(d_s)_{43}$ включительно.

Опытные устройства и лабораторные установки

Экспериментальная база ОИХФ и ИХФ АН СССР, много лет занимающихся в нашей стране данной проблемой, включает в себя многочисленные устройства для исследования кинетики горения конденсированных и газовых систем в виде различных бомб постоянного давления, калориметрических, всестороннего сжатия на давление до 1000 МПа и объемом до 3 л, а также камеры сгорания, модельные энергетические установки, приборы для термических испытаний [9]. Имеются в ОИХФ АН СССР и автоматические пробоотборники, дающие представительную пробу газа при отборе из сверхзвуковой струи продуктов сгорания, содержащих твердую конденсированную фазу.

Описание типичной бомбы постоянного давления, использованной ОИХФ АН СССР для исследования механизма воспламенения и горения частиц магния, приведено в [10]. В этой бомбе в продуктах сгорания модельных твердотопливных составов сжигались частицы магния сферической формы. После сгорания образца при заданном давлении (давление создавалось предварительно с помощью подаваемого из баллона азота) конденсированные продукты горения оседали на поверхность стеклянного стакана, извлекались из бомбы после сброса давления и подвергались дисперсионному анализу. В работе [10] описаны эксперименты по исследованию воспламенения и горения частиц Mg (30—300 мкм) на воздухе при атмосферном давлении.

В ИХФ АН СССР разработана и длительное время используется установка для исследования процесса выгорания агломератов и конденсированных продуктов сгорания [11]. В ней образец требуемой геометрии предварительно заключался в обойму, например из оргстекла, и помещался у боковой поверхности вращающегося барабана ($n = 1000$ об/мин). Поверхность барабана вследствие центробежных сил покрывалась тонким слоем гасящей жидкости — этилового спирта, который

первоначально заливался в барабан. Барабан вместе с образцом устанавливался в бомбу постоянного давления, после чего проводилось сжигание в атмосфере азота при соответствующем давлении. Отобранные продукты сгорания промывались, высушивались и анализировались под микроскопом, по результатам анализа определялось распределение частиц по размерам.

В [12] описана опытная установка с системой визуализации поверхности горения, при этом для определения спектра размеров конденсированных частиц применяется метод отбора на охлаждаемую подложку. При этом образец сжигается в установке постоянного давления или в установке постоянного объема.

Способ отбора проб аэрозоля из факела или сопла и установка на его основе разработаны в НГУ и ИХКиГ СО АН СССР [13]. По этому способу предствительно отбираются аэрозольные частицы или конденсированные продукты сгорания, принадлежащие некоторой части спектра распределения частиц по размерам, а именно — субмикронные частицы. Реализуется способ таким образом: один конец капиллярной трубки помещается в поток исследуемой двухфазной среды, другой — в вакуумированный объем, внутри которого перпендикулярно капилляру на некотором расстоянии от его выходного конца помещена подложка — предметная сетка электронного микроскопа. На нее инерционно осаждаются частицы. Установка с проточным сосудом высокого давления, созданная по этому способу в ИХКиГ СО АН СССР, позволяет отбирать и в дальнейшем исследовать широкий спектр конденсированных продуктов сгорания.

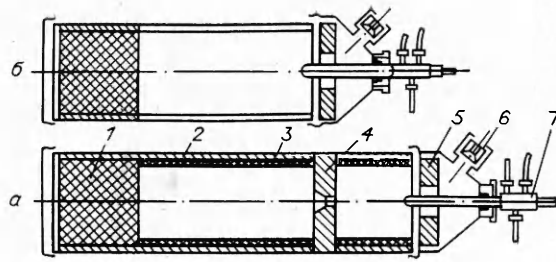
Модельные и натурные установки

Наряду с теоретическими методами исследования двухфазных течений значительное развитие получили и экспериментальные методы. Экспериментальные данные служат для проверки теоретических положений и являются источником информации о процессах, которые до настоящего времени вследствие их сложности не поддаются достаточно строгому теоретическому описанию. Известен ряд работ по определению размеров агломератов и частиц оксида алюминия, образующихся при горении металлизированных составов в экспериментальных энергетических установках. Во Франции в ONERA в свое время получило распространение устройство для захвата конденсированных продуктов сгорания внутри модельной энергетической установки [14, 15]. Это устройство включало в себя маленькие домкраты двойного действия, на конце которых закреплялась кварцевая пластинка размером 6×6 мм. Последняя экспонировалась в камере двигателя двухфазным потоком в течение короткого времени. Данное устройство можно устанавливать либо в сопле, либо в камере энергетической установки. Из-за технических и технологических трудностей конденсированные частицы с помощью такого устройства улавливались только вблизи стенок камеры сгорания. Примененный в дальнейшем пиротехнический домкрат позволил улучшить качество проводимых экспериментов.

В работах [16—18] представлено описание конструкции модельной энергетической установки с размером критического сечения сопла 3×3 мм, предназначенной для исследования процесса дробления агломератов в зависимости от их размеров и параметров ускоряющегося дозвукового потока, а также для визуализации самого процесса. Данная конструкция была снабжена прозрачной вставкой. В камере сгорания размещалось графитовое сопло (с наклоном стенки сужающейся части 15°) для ускорения потока до числа Маха $M = 0,2$. Во время экспериментов эволюция образующихся агломератов регистрировалась высокоскоростной кинокамерой. С помощью сопел и металлизированных составов различных геометрий можно было варьировать параметры двухфазного потока. Использовался составной заряд, изготовленный из метал-

Рис 2. Камера сгорания с промежуточным соплом (а) и без него (б).

1 — металлизированный состав; 2 — корпус энергетической установки; 3 — теплоизоляция; 4 — промежуточное сопло; 5 — диафрагма; 6 — выходное сопло; 7 — пробоотборник.



лизированного и безметалльного топлива. Конструкция такого составного заряда позволяла иметь в поле зрения кинокамеры в каждый момент времени лишь несколько агломератов.

Установка (рис. 2), с помощью которой экспериментально определялись условия дробления капель оксида алюминия в высокотемпературном потоке газа, представлена в работе [19]. Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. В образец металлизированного состава, температура сгорания которого выше точки плавления оксида алюминия, добавлялись частицы оксида алюминия с широким спектром диаметров — от десятых долей до нескольких десятков микрон. Затем образец воспламеняли и сжигали. При движении продуктов сгорания через промежуточное сопло наиболее крупные частицы оксида алюминия разрушались. Размер частиц в камере сгорания и за срезом промежуточного сопла контролировался пробоотборником. По максимальному диаметру неразрушившихся частиц рассчитывали величину критического числа Вебера We_* . Получено, что при движении частиц оксида алюминия в области чисел Рейнольдса $Re \leq 200$ $We_* = 17 \div 22$.

Близка по конструкции к предыдущей экспериментальная сборка, описанная в [20] (рис. 3). Исследования состояли в том, что аэрозольная смесь в цилиндрической камере подвергалась воздействию акустических колебаний, которые генерировались с помощью сирены обратного действия, состоящей из диска с отверстиями, редуктора и электромотора. Амплитуда и частота колебаний варьировались путем изменения числа оборотов диска и зазора между диском и срезом сопла. В методическом плане экспериментальное исследование сводилось к сравнению результатов дисперсионного анализа отобранных проб частиц оксида алюминия, полученных в опытах как при отсутствии колебаний, так и при различных параметрах акустического поля в камере. Итоги этой работы

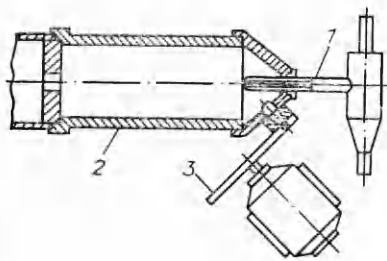


Рис. 3. Экспериментальная установка [20].

1 — устройство для отбора частиц; 2 — цилиндрическая камера; 3 — сирена обратного действия.

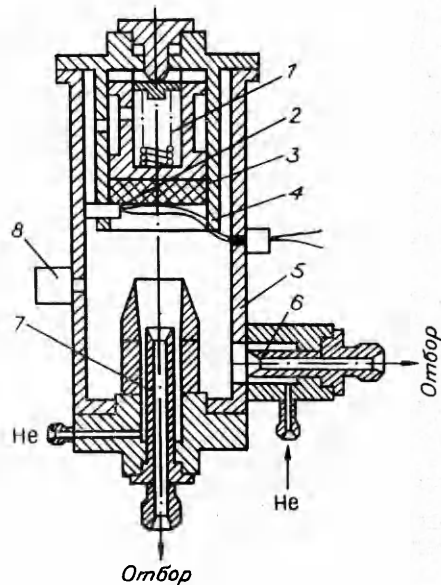


Рис. 4. Схема газогенератора.

1 — пружина; 2 — нить накаливания; 3 — образец металлизированного состава; 4 — держатель; 5 — камера сгорания; 6 — боковой пробоотборник; 7 — торцевой пробоотборник; 8 — тензометрический датчик.

следующие: диаметр частиц не изменяется в камере при амплитудах колебаний до $p_g = 0,02$ МПа в рассмотренном диапазоне частот и при более интенсивных колебаниях с амплитудой до 0,16 МПа и частотах $\nu \leq 500$ Гц. При $p_g > 0,02$ МПа и $\nu > 500$ Гц увеличение размеров частиц становится значительным.

Ряд интересных результатов по исследованию дисперсности частиц оксида алюминия в продуктах сгорания металлизированных составов представлен в [21]. Исследования выполнены с помощью газогенератора, схема которого показана на рис. 4. Работа системы отбора продуктов сгорания основана на замораживании отбираемой пробы гелием в пробоотборнике, установленном в газогенераторе, разделении газовой и конденсированной фаз продуктов сгорания в специальном циклоне с одновременной консервацией пробы инертным по отношению к к-фазе раствором. Исследованы образцы металлизированного состава на основе перхлората аммония, каучука и алюминиевого порошка типа АСД-4 в количестве 1, 2, 5, 10, 15 и 18 %. Испытания образцов проводились при давлении в камере сгорания газогенератора, равном 3,0, 5,0 и 7,5 МПа.

По результатам проведенных экспериментов в [21] сделаны следующие выводы:

- распределения частиц по размерам имеют гораздо более сложный характер, чем это представлялось ранее, что говорит о сложности процессов их образования;

- распределения имеют выраженный бимодальный характер во всем диапазоне исследованных давлений при малом содержании Al в образце (1—5 %);

- во всех распределениях можно выделить мелкую и крупную фракции, причем граница раздела во всех исследованных случаях проходит через один и тот же размер;

- мелкая фракция сохраняет свой максимум в районе диаметров частиц 1,5—2,0 мкм при изменении условий образования;

- при содержании Al в образце (10—18 %) распределения носят неустойчивый характер без ярко выраженных максимумов.

Модельные и натурные установки для отбора конденсированных продуктов сгорания со среза и в выхлопном факеле энергетических установок

По-видимому, наиболее простой способ отбора конденсированных продуктов сгорания из выхлопного факела энергетической установки — это сбор затвердевших частиц в емкость и их последующий статистический анализ (метод камеры). Его широко использовали и используют на американских фирмах Atlantic Research Corporation, Hercules Powder Company, UTC, в лаборатории JPL, в ONERA [14]. Метод камеры реализован в экспериментах с небольшими энергетическими установками. Его суть — собрать все конденсированные продукты сгорания, образовавшиеся при горении металлизированного образца, при этом важно, чтобы в выходном сечении сопла частицы были затвердевшими. Методика позволяет получать усредненное распределение всех конденсированных продуктов сгорания за время всего запуска. В [22] показано, что объем камеры не оказывает влияния на гранулометрию конденсированных частиц.

Отметим, что аналогичный способ отбора конденсированных продуктов сгорания в емкость используется и советскими исследователями. С его помощью получены новые и интересные научные результаты.

Более точным по сравнению с предыдущим является метод улавливания частиц ловушками, помещенными в выхлопной факел энергетической установки. Он может также использоваться для больших энергетических установок и позволяет улавливать частицы в заданный момент времени. Однако при его реализации происходит сильное возмущение потока и возникает вопрос о представительности уловленной про-

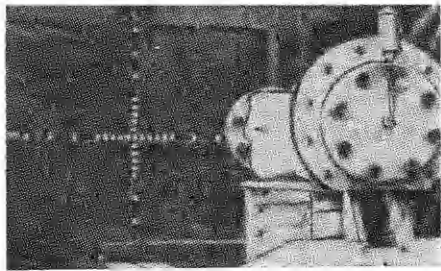


Рис. 5. Улавливание конденсированных частиц с помощью неподвижной крестовины.

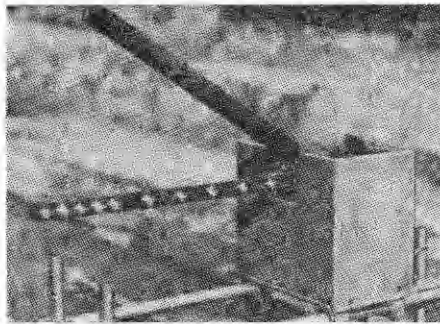


Рис. 6. Улавливание конденсированных частиц с помощью подвижных кронштейнов.

бы частиц. Считается, что первые результаты, полученные с помощью ловушек, изложены в работах [23—25].

В ONERA разработаны собственные методы [14] определения размеров конденсированных продуктов сгорания.

Оборудование для улавливания частиц неподвижными ловушками пригодно при работе энергетической установки в течение нескольких секунд. Метод используется в экспериментах с диаметром критического сечения сопла $d_* < 30$ мм. Наиболее простое и часто применяемое приспособление — крестовина (рис. 5), на каждом кронштейне которой расположены стеклянные пластинки размером 20×20 мм. Расстояние от крестовины до выходного сечения сопла выбирается из условий стойкости пластинок во время запуска и улавливания достаточного числа конденсированных частиц на каждой пластинке. Во время экспериментов в [14] крестовину со стеклянными пластинками помещали на расстоянии, равном 100 диаметрам выходного сечения сопла исследуемой установки.

При продолжительности запуска более 10 с или в случае, когда улавливание частиц хотят провести вблизи выходного сечения сопла установки, специалисты ONERA применяют устройство, показанное на рис. 6. Оно состоит из двух кронштейнов, один из которых снабжен приемными стеклянными пластинками, другой — охлаждается водой и служит для защиты первого. Кинематическая система, приводимая в действие разделительным барабаном, действует так, что позволяет одновременно вводить оба кронштейна в поток, затем поднимать защитный кронштейн (в это время происходит экспонирование стеклянных пластинок), потом опускать этот кронштейн и далее выводить оба кронштейна из выхлопного факела энергетической установки.

Определенный интерес представляет работа [26], в которой приведена информация по отбору частиц в выхлопном факеле энергетической установки с имитацией высотных условий, соответствующих высоте 36 км. Данная работа выполнена в научно-исследовательском центре им. Арнольда (США) в опытной камере J-5. Использовались двигатели первой ступени SRM-1 (типа DS4A) со средней тягой 20 кН и второй ступени SRM-2 (типа DS8C) со средней тягой 76 кН. Двигатели комплектовались стандартными соплами и снаряжались одним и тем же металлизированным составом, состоящим из полибутадиена с концевой гидроксильной группой, перхлората аммония (ПХА) и алюминия. Массовое соотношение компонентов 13 : 68 : 18. Все отборы конденсированных продуктов сгорания получены во время двух испытаний, в которых углерод-углеродное сопло устанавливалось в секцию диффузора.

Методика отбора конденсированных продуктов сгорания в [26] сводилась к установке пробоотборников одноразового использования на точно известное расстояние вниз по потоку от среза сопла в различных радиальных положениях.

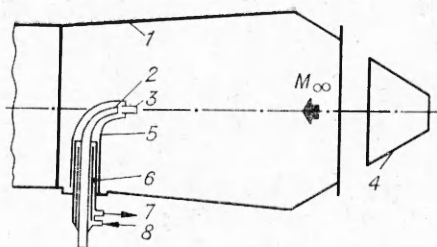


Рис. 7. Пробоотборник в диффузоре высотного стенда J-5.

1 — диффузор; 2 — пробоотборная трубка; 3 — наконечник; 4 — сопло; 5 — абляционное покрытие; 6 — рубашка водяного охлаждения; 7 — подача воды; 8 — слив воды.

Отборник — это трубка из нержавеющей стали диаметром 25,4 мм, помещенная в облицованную углеродистой сталью водяную рубашку (рис. 7). Наконечник изготовлен из вольфрама и пристыкован к трубке пробоотборника. Подача воды в водяную рубашку отборника прекращалась незадолго до окончания работы энергетической установки с целью недопущения попадания воды на углерод-углеродное сопло. Устройство включало в себя три пробоотборных сосуда со столиками с предметными стеклами из меди, углерода или бериллия. По окончании эксперимента осевшие на предметных стеклах конденсированные продукты анализировались с помощью сканирующего электронного микроскопа, совмещенного с рентгеновским дисперсионным масс-спектрометром. Перед началом обсуждения полученных данных отмечается, что все видимые в электронный микроскоп частицы состояли из более мелких частиц, т. е. это были агломераты.

В опыте, проведенном на двигателе DS4A, использовался один пробоотборник, при этом к-фаза в пробоотборные сосуды отбиралась в следующие моменты времени, считая от начала работы двигателя: 1,5 (первый), 13,5 (второй) и 23,8 с (третий сосуд).

Анализ пробы из сосуда 1 показал, что здесь присутствуют частицы из Al и Al_2O_3 с $d_s = 1 \div 4$ мкм (при этом частиц крупнее 4 мкм зарегистрировано всего 4). Все наблюдаемые частицы являлись агломератами, состоящими из более мелких частиц. Последние имели отличную от сферической форму.

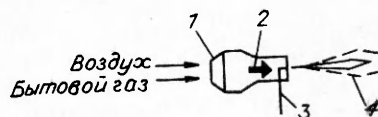
В сосуде 2 обнаружены агломераты неправильной формы, состоящие из Al_2O_3 с $d_s = 0,6 \div 10$ мкм при среднем размере 1,8 мкм. Проведенный дифракционный анализ выявил частицы, состоящие из модификации $\alpha-Al_2O_3$.

Анализ частиц, отобранных в сосуд 3, показал, что предметный столик полностью покрыт веществом серого цвета, содержащим крупные частицы с $d_s = 50 \div 100$ мкм, причем отдельные частицы достигали 1 мм. Обнаружено, что последние состоят из нержавеющей стали и (или) вольфрама, покрытых оболочкой из оксида алюминия. Выявлены также и спекшиеся агломераты из Al_2O_3 . В отношении данного сосуда сделан вывод, что с его помощью корректно отбирать двухфазные продукты сгорания не удастся.

Во время испытаний двигателя DS8C в камере J-5 в центре потока устанавливались два отборника, третий (с впрыском воды) смонтировали в периферийной части потока. Отборы конденсированных продуктов сгорания проводились спустя 1,5, 13,5 и 21,5 с после начала работы двигателя. С помощью отборника с впрыском воды продукты отбирались с 1,5 до 45-й секунды. Суммарное время работы двигателя составляло 72 с. При отборе проб в первые два момента времени система управления вектором тяги находилась в нулевом положении, а в третий — сопло повернули от тангенциального отборника на угол $4,5^\circ$ относительно оси.

Первые две пробы конденсированных частиц отобраны из факела непосредственно внутри видимой границы ядра при нулевом положении сопла. После рентгенофазного анализа выяснилось, что в сосудах 1 и 2 находилось около 40 и 20 % соответственно частиц, состоящих из углерода. Их размеры составили $0,25 \div 0,5$ мкм. В сосуд 3 отобрано небольшое количество частиц. Более 60 % проанализированных частиц состоя-

Рис. 8. Схема экспериментальной установки [27].
 1 — генератор горячего газа; 2 — поток горячего газа;
 3 — осесимметричная двухкомпонентная форсунка;
 4 — пламя.



ли из углерода, крупных частиц из углерода или оксида алюминия зарегистрировано не было.

В отборнике с впрыском воды подавалась дистиллированная вода под высоким давлением и создавалась завеса в процессе улавливания κ -фазы. За время эксперимента в сборной емкости устройства накапливается $\sim 6,75$ л воды с находящимися в ней конденсированными частицами; после фильтрации масса чистого Al_2O_3 составляла ~ 45 г. Проведенный в дальнейшем рентгенофазный анализ выявил наличие в этой массе α - и γ -модификаций Al_2O_3 . Авторы [26] сделали следующие выводы:

1) рассмотренный метод эффективен для сбора конденсированных продуктов сгорания из выхлопной струи энергетической установки;

2) в ядре течения в выхлопном факеле двигателей обнаружены твердые частицы Al_2O_3 , состоящие из очень мелких (менее $0,1$ мкм) частиц;

3) в граничной области по касательной к срезу сопла (непосредственно вблизи видимого ядра течения) отобранные пробы состоят на $60\text{--}80\%$ из Al_2O_3 и на $20\text{--}40\%$ из твердого углерода. Распределение частиц Al_2O_3 по размерам примерно соответствует распределению частиц Al_2O_3 в ядре потока. Наиболее крупные агломераты из твердого С имели размер $0,5$ мкм; у большей части агломератов из твердого углерода $d_s < 0,25$ мкм;

4) обнаружены частицы в граничной области между ядром потока (по касательной к срезу сопла) и недорасширенной границей факела. Они представляли собой механическую смесь Al_2O_3 и С в соотношении $0,4 : 0,6$. Распределение частиц по размерам примерно такое же, как и внутри ядра около границы, но плотность отобранных частиц намного ниже.

В заключение в [26] сказано, что если изложенные результаты верны, то ранее использованные для расчета энергетических характеристик распределения частиц по размерам неточны и должны быть найдены другие источники потерь тяги.

Заслуживает внимания работа [27], в которой исследовано воспламенение и горение облака частиц алюминиево-магниевого сплава ($\text{Al} : \text{Mg} = 0,5 : 0,5$) путем вдува взвешенных в воздухе частиц в поток горячего газа. Принципиальная схема экспериментальной сборки показана на рис. 8.

Установка включала генератор горячего газа, двухкомпонентную осесимметричную форсунку, системы подачи кислорода и металлического порошкообразного горючего. Газогенератор работал на смеси бытового газа и воздуха. Большинство экспериментов проводилось при постоянном соотношении компонентов газовой смеси, равном $0,95$, и массовом расходе $11,7$ г/с, температура и скорость в выходном сечении сопла 1653 К и $9,5$ м/с. Форсунка располагалась на оси сопла либо в его выходном сечении, либо на расстоянии 80 мм вверх по потоку. На протяжении всего эксперимента поддерживались постоянными массовые расходы воздуха и кислорода ($0,350$ и $0,695$ г/с соответственно). В этом режиме скорость воздуха была равна 346 , а кислорода $29,7$ м/с. Система вдува металлического порошкообразного горючего спроектирована так, чтобы при сохранении постоянной скорости воздуха можно было изменять скорость частиц. В ходе проведения экспериментов выяснилось, что эта система успешно функционирует в диапазоне соотношения расходов частиц и воздуха $0,5\text{--}25,0$.

К сожалению, небольшие колебания массового расхода частиц в процессе работы установки полностью устранить не удалось. В [27]

отмечено, что температура максимальна не на оси факела, а смещена приблизительно на расстояние 5 мм по радиусу. Величина $T_{\max} \sim 2973$ К, что на $\sim 300^\circ$ ниже точки кипения Al_2O_3 (3253 К). Заключившая рассмотрение работы [27], отметим, что воспламенение и горение частиц изучалось как непосредственным фотографированием, так и шпирен-фотографированием (1 мкс). Процесс воспламенения и развития пламени в облаке частиц фиксировался также киносъемкой (10 000 кадр/с). Кроме того, горячие частицы в потоке газа и в продуктах сгорания отбирались с помощью плоской пластины; состав частиц анализировали в сканирующем электронном микроскопе и рентгеновским микроанализатором JEM-150 фирмы Nihon Denshi.

Аппаратура для отборов конденсированных продуктов сгорания из следов выхлопных факелов энергетических установок РКК

Отборы конденсированных продуктов сгорания в заданных точках следа выхлопного факела энергетической установки РКК сразу после пролета последнего являются уникальными. Летному эксперименту в нашей стране постоянно уделяется много внимания. Интересные и уникальные эксперименты с помощью летающих лабораторий реализованы, например, в ГТО им. А. И. Воейкова, ЦАО и ряде других организаций.

Большое внимание подобным исследованиям уделяется и за рубежом. Подтверждением этому могут служить эксперименты, описанные в [28]. Здесь задействованы ракеты Титан-III, вертолет UH1N (высоты от нескольких сотен метров до 1 км) и самолет U-2 (высота свыше 20 км). Отметим, что данная работа — пример комбинации контактного и бесконтактного методов измерения, взаимодополняющих друг друга. В работе отмечается, что исследования проведены в связи с тем, что распределение конденсированных частиц по размерам, оказавшихся в следе реактивного двигателя, оказывает влияние на 1) рассеяние света; 2) скорость седиментации этих частиц в воздушной атмосфере; 3) легочные системы человека и животных; 4) физико-химические процессы, протекающие в выхлопном факеле энергетической установки. Схема одной из использованных установок приведена на рис. 9.

Авторы работы [28] пришли к следующим выводам:

1) как для приземного облака, так и для выхлопного факела в стратосфере основное количество конденсированных частиц приходится на субмикронный диапазон с диаметром частиц $\sim 0,1$ мкм. Ранее назывались распределения частиц по размеру со средним диаметром 10 мкм;

2) время жизни конденсированных частиц в приземном облаке и в выхлопном факеле в стратосфере много больше (примерно на величину двух порядков), чем считалось ранее;

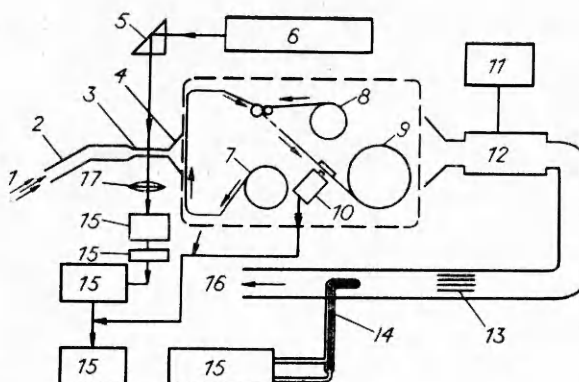
3) счетные концентрации в свежем следе факела исследованного реактивного двигателя составляют 10^{10} $1/\text{м}^3$.

В работе [29] исследовался металлизированный состав, которым снаряжаются стартовые ускорители МТКК «Спейс Шаттл». Ставилась цель определить образующееся количество ледяных ядер конденсации в облаках при сгорании 1 г металлизированного состава и сравнить данные по количеству ледяных ядер и ядер конденсации, зарегистрированных переносными счетчиками, с аналогичными данными, полученными в большой облачной камере.

Проведенные исследования показали, что выхлопные продукты энергетических установок содержат высокие концентрации частиц соответствующего размера и химического состава, позволяющие им быть ядрами конденсации в облаках. По-видимому, такими ядрами являются частицы Al_2O_3 и HCl , их рассчитанный диаметр 0,1 мкм. Число ледяных ядер конденсации, зарегистрированное в экспериментах в изотермической камере при температуре -20°C , колебалось от $3,3 \cdot 10^8$ до $1,5 \cdot 10^{11}$ $1/\text{г}$ (на 1 г сгоревшего металлизированного состава). К полу-

Рис 9. Схема установки [28].

1 — поток; 2 — заборник; 3 — прозрачная трубка; 4 — диффузор; 5 — призма; 6 — лазер (мощность 10 мВт, рабочая частота 6328 Å); 7 — бобина для ленты, на которую улавливается проба; 8 — бобина для ленты, которая защищает уловленную пробу; 9 — бобина для приема двухслойной ленты; 10 — маркер; 11 — реостат контроля; 12 — воздушный насос; 13 — спрямляющее устройство; 14 — трубка Пито; 15 — измерительная аппаратура; 16 — выхлоп; 17 — линза.



ченным данным авторы просят относиться с осторожностью, поскольку в их опыте не моделировалось давление продуктов сгорания в двигателе и наличие частиц почвы в следе двигателя.

Установки, реализующие одновременно контактные и бесконтактные методы диагностики высокотемпературных двухфазных потоков

Рядом исследователей понята необходимость использовать для изучения двухфазных потоков одновременно контактные и оптические методы диагностики.

Работы [30, 31] посвящены измерению полей концентраций, скорости и размеров частиц в двухфазных потоках. Исследовался двухфазный поток, в котором твердые сферические частицы летучей золы ($(d_s)_{43} = 24$ мкм) транспортировались воздухом. Дисперсная фаза (частицы) подавалась с помощью регулируемого червячного питателя в трубу с внутренним диаметром 76 мм, имевшую спрямляющие решетки, турбулизующие сетки и сопло. Относительно массовое содержание частиц в потоке варьировалось от 1 до 5 %. Измерение полей скорости воздуха в отсутствие частиц проводилось трубкой Пито; для определения спектров размеров частиц применялся изокинетический зонд диаметром 1 мм; концентрация частиц определялась оптическим методом с использованием денситометра и мини-ЭВМ. Отобранная изокинетическим зондом проба анализировалась с помощью сканирующего электронного микроскопа и автоматического счетчика.

Установлено, что на распределение концентрации частиц в потоке оказывают влияние скорость потока, массовый расход частиц из питателя, форма сопла. Профили полей концентрации частиц в потоке имеют значительно меньшую ширину, чем профили полей скорости. Распределение частиц по размерам в различных сечениях потока во время эксперимента оставалось практически неизменным. Выявлено также, что наличие частиц в потоке оказывает влияние на структуру скачка уплотнения на выходе из сопла.

Заканчивая обзор, скажем и о работе [32], посвященной современной диагностике процессов горения. Ее автор, рассмотрев и подвергнув критическому анализу работы [33—38], пришел к выводу о том, что «при изучении процессов горения в камерах еще долго будут применяться зондовые методы, но развитие новых оптических методов дает возможность сравнивать результаты измерений и устанавливать пределы применимости зондовых методов, в первую очередь термоанемометра и газоотборных устройств».

Заключение

Контактные методы диагностики в настоящее время находят широкое применение при исследовании дисперсной фазы в высокотемпературных двухфазных продуктах сгорания энергетических установок. Раз-

работан ряд методов, создано и эксплуатируется значительное количество устройств и установок для отбора конденсированных продуктов сгорания и измерения их отдельных характеристик в условиях модельных камер сгорания, на срезе сопла, в выхлопном факеле и следе реактивных двигателей ракетно-космических комплексов. С помощью созданных устройств и установок получен ряд интересных и важных результатов.

Можно полагать, что последующий этап диагностики высокотемпературных двухфазных потоков — постоянная комбинация контактных и бесконтактных методов измерений. Представляется целесообразным выбрать из числа уже созданных или разработать вновь типовые экспериментальные установки для исследования процессов горения в реактивном двигателе и образующихся при этом в камере и на срезе сопла двигателя конденсированных продуктов сгорания. Целесообразно также создание типовой методики отбора и обработки полученных экспериментальных данных с целью создания единого компьютерного банка (коллекции) данных дисперсностей конденсированных продуктов сгорания, образующихся при горении штатных и перспективных металлизированных составов.

В заключение авторы благодарят за плодотворные дискуссии Е. И. Гусаченко, Л. Н. Стесика, В. И. Шевцова, В. П. Фурсова, а также Е. М. Вендину и Т. Ф. Лескову за помощь в изготовлении рисунков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев С. П., Никифорова Н. К., Смирнов В. В. и др. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей.— М.: Энергоиздат, 1981.
2. Ринкевичюс Б. С. Лазерная анемометрия.— М.: Энергия, 1978.
3. Эдварс, Уинвер, Адамс и др. Установка для спектроскопических исследований химии горения твердых ракетных топлив // Приборы для научных исследований.— 1985.— № 11.
4. Хасса, Хансон. Применение лазера для быстрого создания аэрозоля с целью визуализации течений газа // Там же.— № 4.
5. Пилипенко Н. В., Ходунков В. П. Устройство для измерения скорости двухфазного потока // Изв. ВУЗов. Приборостроение.— 1989.— № 3.
6. Гусаченко Е. И., Стесик Л. Н., Фурсов В. П. и др. Исследование конденсированных продуктов горения магниевых порошков. Зависимость от давления // ФГВ.— 1974.— 10, № 4.
7. Эйзель, Браун, Прайс. Влияние давления, скорости и геометрии на размеры частиц Al_2O_3 , образующихся при горении алюминизированного твердого состава // РТК.— 1975.— 13, № 7.
8. Kraeutle K. J. Particle size analysis of aluminized propellants // AJAA Paper.— 1977.— N 77-0978.
9. Рухман И. Н., Кукушкин В. И. Устройства для исследования горения конденсированных систем // Горение конденсированных систем. Химическая физика процессов горения и взрыва.— Черноголовка, 1986.
10. Фурсов В. П. Механизм воспламенения и горения частиц магния: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук/АН СССР. ИХФ.— Черноголовка, 1982.
11. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах.— М.: Наука, 1972.
12. Шелухин Г. Г., Булдаков В. Ф., Белов В. П. Экспериментальное исследование процесса горения гетерогенных конденсированных систем // ФГВ.— 1969.— 5, № 1.
13. Глотов О. Г., Пащенко С. Э., Карасев В. В. и др. Методы отбора и гранулометрического анализа конденсированных продуктов горения // Физика аэродисперсных систем.— Киев; Одесса: Вища шк., 1986.— Вып. 30.
14. Kuentzmann P. Etude experimentale de la phase condensee dans les produits de combustion des propergols solides metallises // La Recherche Aerospaciale.— 1973.— 153, N 2.
15. Kuentzmann P. Formation of the condensed phase in a metallized solid propellant rocket engine. ESROTT-156. Office National d'Etudes et de Recherches Aerospaciales.— Chatillon, France, 1975.
16. Caveny L. H., Gany A. Aluminum combustion under rocket motor conditions: AGARD Propulsion and Energetics Panel Symp. on Solid Rocket Motor Technology, April 2—5, 1979.— Oslo, Norway.
17. Gany A., Caveny L. H., Summerfield M. Aluminized solid propellants burning in a rocket motor flowfield // AJAA Paper., 1977.— N 77-0929.
18. Caveny L. H., Gany A. Breakup of Al/Al_2O_3 agglomerates in accelerating flowfields // AJAA J.— 1979.— 17, N 12.
19. Буглаева Л. Д., Вернидуб И. И., Корсунов Ю. А. и др. Экспериментальное опре-

- деление условий дробления капель окиси алюминия в высокотемпературном потоке газа // ИФЖ.— 1974.— XXVI, № 5.
20. Буглаева Л. Д., Буряченко В. Д., Вернидуб И. И. и др. Исследование коагуляции расплавленных частиц оксидов металлов в высокотемпературном газовом потоке под воздействием акустических колебаний // Там же.— 1981.— XI, № 2.
 21. Федоров Б. Н., Плечов Ю. Л., Тимошин Э. М. Исследование дисперсности частиц окиси алюминия в продуктах сгорания конденсированных веществ // ФГВ.— 1982.— 18, № 1.
 22. Dobbins R. A., Strand L. D. A comparison of two methods of measuring particle size of Al_2O_3 produced by a small rocket motor // AJAA J.— 1970.— 8, N 9.
 23. Cheung H. S., Cohen N. Performance of solid propellants containing metal additives // Ibid.— 1965.— 3, N 2.
 24. Crowe G. T., Willoughby P. G. A mechanism for particle growth in rocket nozzle // Ibid.— 1966.— 4, N 9.
 25. Crowe G. T., Willoughby P. G. A study of particle growth in a rocket nozzle // Ibid.— 1967.— 5, N 7.
 26. Girata P. T., McGregor W. K. Particle sampling of solid rocket motor (SRM) exhausts in high altitude test cells // AJAA Paper.— 1983.— N 83-0245.
 27. Yuasa S., Takeno T. Ignition and combustion of magnesium — aluminium alloy particle clouds in a hot gas stream // 19th Symp. (Int.) on Combustion.— Haifa, 1982.
 28. Strand L. D., Bowyer J. M., Varsi G. et al. Characterization of particulates in the exhaust plume of large solid — propellant rockets // J. Spacecraft and Rockets.— 1981.— 18, N 4.
 29. E. E. Hindman II, D. M. Garvey, G. Langer et al. Laboratory investigations of cloud nuclei from combustion of space shuttle propellant // J. Applied Meteorology.— 1980.— 19, N 2.
 30. Hayashi K., Branch M. C. Concentration, velocity and particle size measurements in gas-solid two-phase jets // AJAA Paper.— 1980.— N 80-0351.
 31. Hayashi K., Branch M. C. Concentration, velocity and particle size measurements in gas-solid two-phase jets // J. Energy.— 1980.— 4, N 5.
 32. Ягодкин В. И. Современная диагностика процессов горения // Новое в зарубежном авиадвигателестроении.— 1977.— № 6.
 33. Lederman S. Modern diagnostics of combustion // AJAA Paper.— 1976.— N 76-26.
 34. Setchell R. E. Time-averaged measurements in turbulent flames using Raman spectroscopy // Ibid.— N 76-28.
 35. Moya F., Druet S., Pealat M. et al. Flame investigation by coherent anti-stokes Raman scattering // Ibid.— N 76-29.
 36. Chigier N. A. Combustion diagnostics by laser velocimetry // Ibid.— N 76-32.
 37. Owen F. K. Laser velocimeter measurements of a confined turbulent diffusion flame burner // Ibid.— N 76-33.
 38. Gunther R. Methods for turbulence measurement in flames // Ibid.— N 76-36.

г. Москва

Поступила в редакцию 30/V 1990

УДК 534.222.2

С. М. Фролов, Б. Е. Гельфанд

ОСЛАБЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

Предложен приближенный метод расчета затухания УВ в каналах с проницаемыми стенками. Метод основан на предположении, что скорость УВ зависит от проницаемости стенок, гидравлического диаметра канала, начальной скорости УВ и пройденного расстояния. Результаты удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

В работах [1, 2] предложен эффективный приближенный метод расчета ослабления ударных волн (УВ) в каналах с преградами и завесами. В предлагаемой работе этот метод распространен на задачу о затухании плоской УВ в канале с проницаемыми стенками. Интерес к указанной проблеме вызван необходимостью всестороннего изучения развития и последствий взрывов в полуграниченных объемах и трубопроводах, снабженных выпускными отверстиями для аварийного сброса давления. Известно, что даже небольшое «раскрытие» трубопровода такими отверстиями приводит к снижению скорости пламени и уменьшению максимального избыточного давления [3].