

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В ВЫХЛОПНЫХ СТРУЯХ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О. Б. Ковалёв

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск, kovalev@itam.nsc.ru

Проведен анализ процессов коагуляции и аэродинамического дробления жидких частиц оксида алюминия в ускоряющемся газовом потоке сопла Лавала. Для вычисления характерного диаметра частиц на выходе из сопла предложена формула, полученная в результате приближенного аналитического решения уравнений двухфазного течения. Рассчитанный теоретически предельный диаметр частиц в критическом сечении близок к среднемассовому диаметру, который получается при численном моделировании полидисперсных двухфазных течений с коагуляцией и дроблением частиц. Предложенная формула согласуется с корреляционными зависимостями Р. В. Хермсена и подтверждается многочисленными опубликованными данными измерений среднемассового диаметра частиц оксида алюминия в выхлопных струях малых, средних и крупных твердотопливных ракетных двигателей. Формула содержит физические параметры, значения которых легко вычисляются и задаются. Проведено тестирование формулы по входящим в нее параметрам. На основании сопоставления теоретических расчетов с многочисленными экспериментальными данными формула рекомендована для предсказания размера частиц оксида алюминия в выхлопных струях различных типов ракетных двигателей на твердом топливе.

Ключевые слова: ракетный двигатель, двухфазное течение, оксид алюминия, дробление капель.

ВВЕДЕНИЕ

Горение смесевых твердых топлив сопровождается накоплением и агломерацией частиц алюминия на горячей поверхности. По оценкам специально проведенных исследований [1–5] диаметры агломератов частиц, которые выносятся с поверхности газообразными продуктами разложения топлива, могут изменяться от исходных значений $5 \div 10$ мкм до $200 \div 800$ мкм. Находясь на поверхности или вблизи нее, агломераты успевают воспламениться, так что в камере сгорания формируется двухфазное течение с жидкими горящими полидисперсными частицами. Причем частицы (ввиду различия их масс) движутся относительно газа с различными скоростями и могут сталкиваться друг с другом. Особенно крупные агломераты частиц, увлекаемые газовым потоком, могут дробиться за счет возникающей в них неустойчивости Рэля — Тейлора. Горение металлических частиц в камере сгорания протекает при температуре окружающего газа $\approx 3000 \div 3500$ К и сопровождается образованием конденсированного оксида алюминия, поэтому после выгорания алюминия в частице остается его оксид в жидком состоянии. Это

указывает на то, что агломераты частиц, попадая в поток и пролетая в камере сгорания расстояние от поверхности горения до сопла, не успевают существенно измениться в диаметре. Даже в случае полного выгорания алюминия агломераты частиц изменяются в диаметре всего лишь на $20 \div 40$ % [6].

В работе [7] дана обширная библиография опубликованных ранее данных измерений среднемассового диаметра D_{43} частиц в выхлопных струях ракетных двигателей, отличающихся габаритами, составом и типом топлива, содержанием алюминия, геометрией сопла и т. д. Там же для расчета D_{43} приведен ряд эмпирических корреляционных зависимостей, полученных методом наименьших квадратов. Согласно [7] среднемассовый диаметр отобранных на выходе из сопла частиц Al_2O_3 находится в пределах $0,25 \leq D_{43} \leq 13,3$ мкм.

В [8] представлены результаты регистрации размеров частиц конденсированной фазы не только на выходе из сопла, но и в камере сгорания малоразмерных двигателей с каналным и торцевым горением. Наблюдение и оптическая регистрация частиц в камере сгорания проводились с помощью специального окна, встроенного в корпус двига-

теля. Окно устанавливалось либо перед входом в сопло, либо у поверхности топлива. Согласно [8] при давлении 3,6 МПа наблюдалось нормально-логарифмическое распределение по размерам агломератов Al, покидающих поверхность топлива. При этом средний диаметр $D_{32} = 132$ мкм (стандартное отклонение 18 мкм) был значительно больше, чем у исходного порошка Al в топливе. На входе в сопло массовая концентрация мелких частиц ($D_{32} < 2$ мкм) была меньше 10 %, наибольшее количество составляли частицы с диаметром $D_{32} < 50$ мкм и совсем немного — с $D_{32} < 85$ мкм. На выходе из сопла зарегистрирован средний размер D_{32} менее 2,5 мкм.

Таким образом, жидкие частицы алюминия или оксида алюминия претерпевают наибольшие изменения в размерах при движении через сопло двигателя.

Проблемы предсказания размеров частиц конденсированной фазы при течении двухфазных продуктов горения в ракетном двигателе давно обсуждаются научной общественностью. На эту тему опубликовано множество работ (см., например, [9–20]), созданы математические модели и компьютерные программы для расчета многомерных (двумерных [15–18] и трехмерных [19, 20]) двухфазных течений с учетом распределения частиц по размерам, горения частиц, их коагуляции и дробления.

Исторически сложилось так, что модельные представления о движении двухфазной смеси складывались на основе экспериментальных исследований применительно к течениям в соплах ракетных двигателей [9–19]. Модели двухфазных течений первоначально [9] строились в предположении малости размеров частиц ($\approx 1 \div 2$ мкм), их незначительной объемной концентрации ($\leq 10^{-5}$), отсутствии какого-либо влияния на газ и взаимодействия друг с другом. Газ играл роль несущей фазы, действие которой сводилось к появлению силы сопротивления, обусловленной вязкостью газа и трением при обтекании частицы. Учет влияния объема частиц и стесненности течения [10] усложнили уравнения движения, тип которых стал составным в зависимости от условий течения [21], что затруднило постановку начально-краевых задач. Для учета взаимодействия частиц между собой были предложены модели полидисперсных двухфазных течений, позволяющие рассчитывать рост частиц за счет столкновения и коагуляции [11–13], которые затем были до-

полнены описанием эффектов дробления частиц при соударениях [14–17].

Одним из главных принципов механики гетерогенных сред [22] является условие сохранения вложенности масштабов смеси. Иными словами, характерный масштаб, на котором осредненные параметры течения изменяются существенно, должен быть много больше масштаба неоднородности (т. е. размеров частиц). Таким образом, предположения о малости размеров частиц и их невысокой объемной концентрации являются наиболее сильными требованиями во всех моделях двухфазных течений и отказаться от них невозможно.

Важнейшим фактором, существенно сдерживающим рост частиц, является их аэродинамическое дробление, вызванное силовым воздействием газа. Для описания аэродинамического дробления жидких частиц используется критерий Вебера, который характеризует отношение газодинамического напора на частицу к поверхностному натяжению. Это обстоятельство способствует соблюдению масштабного принципа в теории двухфазных течений.

В [23] представлены результаты одномерных модельных расчетов полидисперсного двухфазного течения в сопле Лаваля с учетом коагуляции и дробления жидких частиц по методам Лагранжа и Вебера [15], в расчетах варьировались функция распределения по размерам частиц Al_2O_3 на входе в сопло и геометрические характеристики сопла (диаметр и радиус кривизны критического сечения). Для оценки предельного диаметра δ_t жидких частиц в критическом сечении в [23] предложена аналитическая формула, результаты расчета по которой хорошо согласуются с величиной D_{43} . При этом показано, что значения D_{43} и δ_t в критическом сечении слабо зависят от предыстории функции распределения частиц и их размеров на входе в сопло.

Анализ результатов численного моделирования [11–20, 23] полидисперсных двухфазных течений с жидкими частицами в соплах твердотопливных ракетных двигателей позволяет представить следующую картину изменения дисперсного состава частиц конденсированной фазы. Зависимость среднемассового диаметра D_{43} от осевой координаты x претерпевает наибольшее изменение в дозвуковой части сопла, включая горловину. Если размер частиц на входе в сопло мал ($D_{43}(0) = 0,01 \div 2$ мкм), то в расчетах [11–20, 23] наблюдается монотонный

рост зависимости $D_{43}(x)$, который поддерживается коагуляцией за счет столкновения частиц между собой вследствие различия их скоростей по отношению к скорости газа. Условия аэродинамического дробления по критерию Вебера $We \geq We_{cr}$ для частиц таких размеров оказываются либо совсем не достижимыми, либо выполняются для крупных единичных фракций. Эффекты дробления за счет столкновения могут проявляться крайне редко и лишь для одиночных частиц. После прохождения горловины поток расширяется и двухфазное течение расслаивается так, что в ядре остаются более крупные фракции частиц, а мелкие, увлекаемые газом, изменяют свою траекторию и отклоняются к стенке сопла [16–19]. В этих условиях, к тому же, становится малым отставание частиц от газа по направлению осевой составляющей скорости потока. Вследствие этого существенно снижается количество столкновений между частицами, и значения D_{43} почти не меняются. Если на вход в сопло подаются крупные частицы с $D_{43}(0) = 20 \div 100$ мкм, то зависимость $D_{43}(x)$ имеет участки монотонного роста и резкого спада [23]. Такое поведение $D_{43}(x)$ вызвано дроблением частиц при достижении ими критических условий ($We \geq We_{cr}$). При этом эффект аэродинамического дробления преобладает над коагуляцией, и значение D_{43} убывает с ростом x .

Анализ расчетов [23] показал, что в результате аэродинамического дробления и коагуляции частиц в ускоряющемся газовом потоке полидисперсное двухфазное течение организуется таким образом, что среднemasсовый диаметр $D_{43}(x)$ стремится к предельному значению, которое достигается в горловине сопла, и затем почти не изменяется до самого среза. В этих условиях режим обтекания частиц почти всегда остается близким к закону Стокса: $C_x = 24/Re$. Отклонение от этого закона неизбежно приводит к развитию неустойчивости Рэлея — Тейлора внутри частицы, которая в условиях быстрого ускорения потока газа особенно в дозвуковой части сопла протекает почти мгновенно, что и приводит к дроблению частицы. К сожалению, количественные характеристики аэродинамического дробления (число и размеры) образующихся капель-осколков не поддаются строгому описанию. В [8], например, отмечается, что почти все крупные агломераты превращаются в большое количество мельчайших частиц при их движении вдоль ка-

меры сгорания.

Совместный анализ результатов многочисленных экспериментальных исследований [7, 8] и численного моделирования [11–20, 23] позволяет сделать вывод о том, что жидкие частицы оксида алюминия претерпевают наибольшие изменения в размерах при движении через дозвуковую часть сопла, включая горловину. При этом в сверхзвуковой части сопла, где происходит расширение течения, диаметры жидких частиц изменяются мало. В связи с этим возникает вопрос о возможности использования аналитической формулы [23] для оценки размеров частиц на выходе из сопла.

В настоящей работе проведен расчетно-аналитический анализ и дана оценка степени дробления и коагуляции жидких частиц в соплах твердотопливных ракетных двигателей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим двухфазное течение с жидкими частицами одинаковых размеров. Концентрация частиц мала, и поэтому можно пренебречь их взаимодействием при столкновениях друг с другом [15]. Течение описывается следующими уравнениями:

$$\frac{dw_s}{dx} = \varphi_1 \left(\frac{w}{w_s} - 1 \right), \quad (1)$$

$$\frac{dT_s}{dx} = \varphi_2 \left(\frac{T - T_s}{w_s} \right), \quad (2)$$

$$\rho w \frac{dw}{dx} + \rho w W \frac{dw_s}{dx} + \frac{dP}{dx} = 0, \quad (3)$$

$$c_p T + \frac{w^2}{2} + W \left(c_b T_s + \frac{w_s^2}{2} \right) = E_0, \quad (4)$$

$$\rho w F = m_0, \quad (5)$$

$$P = \rho R_g T. \quad (6)$$

Здесь w_s , T_s , w , T — скорость и температура частиц и газа; P , ρ , R_g — давление, плотность и универсальная газовая постоянная; c_p , c_b — удельные теплоемкости газа и материала частиц; W — массовая концентрация частиц, которая для установившегося течения считается постоянной; E_0 , m_0 — константы; $F = \pi R^2(x)$ — площадь поперечного сечения сопла,

где $R(x)$ — радиус его контура; φ_1^{-1} , φ_2^{-1} — времена релаксации скоростного и температурного запаздывания частиц относительно газа:

$$\varphi_1 = \frac{18\mu}{\delta_s^2 \rho_b}, \quad \varphi_2 = \frac{6\text{Nu}_p \mu}{\text{Pr} \rho_b c_b \delta_s^2}, \quad (7)$$

где Pr , Nu — числа Прандтля и Нуссельта; δ_s — диаметр частиц; ρ_b — плотность материала частиц; μ — вязкость газа. Для того чтобы учесть особенности аэродинамического дробления частиц, рассмотрим дополнительно к (1)–(6) критерий Вебера:

$$\text{We} = \frac{\rho(w - w_s)}{\sigma_b} \geq \text{We}_{cr}, \quad (8)$$

где σ_b — поверхностное натяжение материала жидкой частицы. По достижении числом Вебера в некотором сечении сопла критического значения We_{cr} все частицы дробятся одновременно на одинаковое количество равных по массе осколков в этом сечении. Это, на первый взгляд, жесткое ограничение оставляет нас в рамках модели течения (1)–(6) и вместе с тем не ограничивает общности результата.

ПРИБЛИЖЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Авторы [23] предлагают рассматривать критерий Вебера (8) не только как закон дробления жидких частиц, но также и как уравнение для расчета допустимого диаметра частиц. Другими словами, каждой точке x по оси сопла ставится в соответствие некоторый допустимый диаметр $\delta(x)$, который связан с параметрами двухфазного потока в этом сечении уравнением (8). Следуя методу линеаризации уравнений (1)–(6) [15], при небольшом отставании частиц от газа удается выразить параметры газа и частиц, входящие в (8), через параметры равновесного двухфазного течения и получить формулу [23]

$$\delta(x) = \left\{ \frac{\text{We}_{cr} (18\mu)^2 \sigma_b (1+W)}{\rho_b^2 \rho_e (w_e dw_e/dx)^2} \right\}^{1/5}, \quad (9)$$

где w_e , ρ_e — скорость и плотность равновесного двухфазного течения. Это означает, что в каждом сечении сопла существует линейный размер $\delta(x)$, который ограничивает прохождение частиц большего размера через это сечение. Если записать решение уравнений равновесного двухфазного потока в виде формул изэнтропического течения псевдогаза [15] с эффективными значениями плотности и теплоемкости ($\rho_e = (1+W)\rho$, $c_p^e = (c_p + c_b W)/(1+W)$,

$c_v^e = (c_v + c_b W)/(1+W)$), то допустимый диаметр в каждом сечении сопла представляется в виде функции от приведенной скорости равновесного течения λ_e , где

$$\lambda_e = \frac{w_e}{a_e^*} \left(\frac{2}{k_e + 1} \right)^{-1/2},$$

$a_e^* = \sqrt{k_e P_e^* / \rho_e^*}$ — скорость звука, P_e^* , ρ_e^* — давление и плотность в заторможенном равновесном потоке.

В [23] показано, что функция $\delta(\lambda_e)$ имеет минимум, который достигается в горловине сопла при $\lambda_e = 1$ и выражается формулой

$$\delta_t = \left\{ 162 R_C D_t \frac{\sigma_b \text{We}_{cr}}{\rho_b^2} \frac{\mu^2}{k_e^2 R_e T_e^* P_e^*} \times \right. \\ \left. \times (1+W) \left(\frac{k_e + 1}{2} \right)^{(3k_e - 2)/(k_e - 1)} \right\}^{1/5}, \quad (10)$$

где R_C и D_t — радиус кривизны и диаметр критического сечения; $R_e = c_p^e - c_v^e$ и $k_e = c_p^e / c_v^e$ — постоянная псевдогаза и отношение удельных теплоемкостей равновесного течения; T_e^* — значения температуры в заторможенном равновесном потоке.

Если предположить, что параметры торможения равновесного течения приближенно равны соответствующим параметрам в камере сгорания ($P_e^* \approx P_C$, $T_e^* \approx T_C$), то формула (10) позволит рассчитать предельно допустимый диаметр частиц δ_t в критическом сечении для заданной геометрии сопла, давления и температуры в камере сгорания. Заметим, что для крупных частиц диаметр δ_t является нижним пределом, к которому их диаметры должны стремиться за счет аэродинамического дробления, а для мелких частиц δ_t — верхний предел, к которому их диаметры тоже должны стремиться, но за счет коагуляции при столкновениях.

Массовая концентрация частиц W оценивается приближенно. Предполагается, что расход частиц $\rho_s w_s$ (где ρ_s — средняя плотность частиц) и расход газа ρw на единицу площади зависят от скорости горения ω_T , средней плотности топлива ρ_T и массовой доли Al в топливе z : $\rho_s w_s = z \rho_T \omega_T$, $\rho w = (1-z) \rho_T \omega_T$. Отсюда следует, что $W = z/(1-z)$. Данная оценка никак не учитывает влияние горения частиц Al. Однако заметим, что при горении Al в продуктах разложения топлива изменяются свойства как самой частицы (она превращается в оксид), так

и окружающего газа, который содержит пары Al и его соединений (с кислородом, хлором и т. п.). Поэтому расходы газа ρw и частиц $\rho_s w_s$ не будут постоянными. Однако можно предположить, тем не менее, что отношение расходов W в каждом сечении сопла слабо изменится и верна приближенная оценка по формуле $W = z/(1 - z)$.

Расчеты одномерных уравнений полидисперсного (с коагуляцией и дроблением по методу Лагранжа и Вебера) двухфазного течения показали [23], что среднемассовый диаметр частиц в критическом сечении и на выходе сопла близок к диаметру δ_t (10).

Известны результаты многомерных численных исследований двухфазных полидисперсных течений в соплах [16–20], выполненные с высоким уровнем математического и численного моделирования процессов коагуляции и дробления частиц, где на качественном и количественном уровне показано, что функция распределения частиц конденсированной фазы в двухфазном потоке в сопле близка к нормально-логарифмическому распределению. При этом среднемассовый диаметр частиц больше всего изменяется в дозвуковой части сопла. При невысокой объемной концентрации частиц ($\approx 10^{-5} \div 10^{-4}$), что характерно для топлив с умеренным содержанием Al (до 25 % по массе), в сверхзвуковой части потока среднемассовый диаметр слабо изменяется по длине сопла и на выходе из него мало отличается от своего значения в горловине.

Анализ расчетов [16–20, 23] косвенно подтверждает вывод о том, что формула (10), по видимому, может быть использована для оценки размеров частиц не только в критическом сечении, но и на срезе сопла.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЙ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В [7] приведены результаты измерения среднемассового диаметра D_{43} в выхлопных струях продуктов горения большого количества ракетных двигателей малых и крупных размеров. Табл. 1, заимствованная из [7], содержит геометрические характеристики сопла, состав твердого топлива и параметры его горения в камере сгорания, при которых проводились измерения D_{43} . Согласно данным [7] среднемассовый диаметр D_{43} отобранных частиц Al_2O_3 находится в пределах $0,25 \leq D_{43} \leq 13,3$ мкм.

В табл. 2, также взятой из [7], приведены корреляционные формулы для вычисления D_{43} по результатам этих измерений. Обозначения параметров в табл. 1 и 2, а также их размерности соответствуют принятым в [7]: ξ_C — концентрация оксида алюминия в условиях камеры сгорания, (г·моль)/100 г; T_C — температура в камере по шкале Ренкина, °R; P_C — давление в камере, psia; R_t или D_t — радиус или диаметр горловины сопла, дюйм; R_C — радиус кривизны горловины сопла, дюйм; $\bar{\tau}$ — время пребывания в камере сгорания, мс; D_{43} — среднемассовый диаметр, мкм; Re_t — число Рейнольдса в горловине сопла.

Корреляции [7] содержат от 3 до 6 свободных физических параметров. Формула 9 (табл. 2), включающая четыре параметра, рекомендована в [7, 24] как наилучшая и, по мнению авторов [24], дает хорошее согласие с результатами измерений размеров частиц в выхлопной струе полноразмерного крупногабаритного двигателя класса Шаттл, где $11,2 \leq D_{43} \leq 13,74$ мкм. Заметим, что в корреляционных формулах [7] физические параметры ξ_C и $\bar{\tau}$ достаточно трудно рассчитать теоретически или измерить.

Данные [7] (см. табл. 1) по каждому эксперименту содержат необходимые величины для расчета δ_t по формуле (10), что позволило провести тестирование указанной формулы в широких диапазонах изменения содержания алюминия в топливе, параметров в камере сгорания (давления, температуры) и геометрии сопла (радиуса кривизны, диаметра горловины). Табл. 1 из [7] дополнена справа колонкой расчетных значений δ_t для каждого эксперимента.

Обращает на себя внимание то, что степени, в которые возводится диаметр горловины D_t в корреляционных формулах табл. 2, близки к значению 0,2, полученному нами в (10). В некоторых корреляциях, например № 7 и 11, также близки к значению 0,2 степени давления P_C в камере сгорания. Заметим, что ни в одной из корреляций [7] не учитываются свойства материала частиц и температура газа.

На рис. 1 представлено сопоставление значений δ_t , рассчитанных теоретически по формуле (10), с данными экспериментов [7] для D_{43}^{exp} из табл. 1. Полное совпадение теории с экспериментом наблюдается на линии $\delta_t = D_{43}^{exp}$. На рис. 2 дано аналогичное сопоставление корреляционной зависимости D_{43}^{cor} из табл. 2 (см. № 9) с данными экспериментов [7]

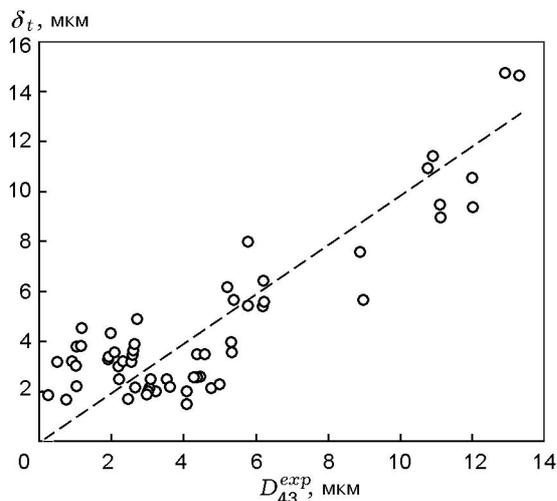


Рис. 1. Сравнение рассчитанных по формуле (10) значений δ_t в критическом сечении сопла с данными экспериментов [7] для D_{43}^{exp} (см. табл. 1) на выходе из сопла:

совпадение имеет место на линии $\delta_t = D_{43}^{exp}$

для D_{43}^{exp} . Как видно, различия сравниваемых на рис. 1, 2 параметров невелики.

Параметры жидких капель Al_2O_3 задавались следующие: $\rho_b = 3060$ кг/м³, $\sigma_b = 0,7$ Н/м, $c_b = 1400$ Дж/(кг·К); были выбраны следующие значения газодинамических параметров: $\mu = 6,55 \cdot 10^{-5}$ (Н·с)/м², $c_p = 1922$ Дж/(кг·К), $R_g = 397$ Дж/(кг·К).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ опубликованных расчетов и экспериментальных данных об изменении дисперсного состава двухфазного течения в сопле твердотопливного ракетного двигателя. Показано, что при численном моделировании полидисперсных двухфазных течений среднемассовый диаметр D_{43} в сверхзвуковой области течения изменяется слабо и на выходе из сопла мало отличается от своего значения в горловине.

Поскольку приближенная оценка предельно допустимого размера частиц в горловине (10) согласуется с величиной D_{43} , формулу (10) можно использовать для предсказания размеров частиц не только в горловине, но и на срезе сопла. Это подтверждают представленные на рис. 1, 2 сопоставления формулы (10) с корреляционной зависимостью Р. В. Хермсена и экспериментальными данными [7, 8] (см. табл. 1).

Имеющиеся расхождения с эксперимента-

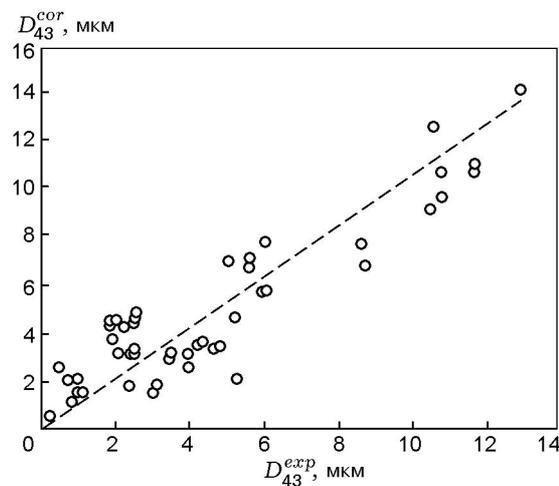


Рис. 2. Сравнение значений D_{43}^{cor} , рассчитанных по корреляционной зависимости № 9 из табл. 2 с данными экспериментов [7] для D_{43}^{exp} (см. табл. 1)

ми объясняются следующим.

1. Необходимые для (10) параметры газа μ , R_g и c_p отсутствуют в [7], поэтому их пришлось оценивать приближенно, оставляя затем постоянными во всех расчетах.

2. Приближенно оценивается расходная концентрация жидких частиц W .

3. Свойства материала частиц ρ_b , c_b , σ_b зависят от температуры, которая в условиях двухфазного течения в сопле может изменяться.

4. При незначительной концентрации частиц в потоке (например, в экспериментах № 19, 38, 40, 65 [7] с содержанием Al в топливе 2, 3, 5 %, см. табл. 1) среднемассовый диаметр частиц не успевает достигнуть предельного размера δ_t . Поэтому расхождение с этими экспериментами более 100 %.

5. Трудно объяснить, почему при пониженном давлении имеют место такие низкие значения D_{43}^{exp} (эксперименты № 35, 56, 59, 63 в табл. 1). Низкое давление газа в камере сгорания, с одной стороны, способствует росту размеров агломератов частиц Al на горячей поверхности [1–5], а с другой — при низком давлении силовое воздействие газа на частицы невелико, поэтому и степень дробления частиц не может быть настолько высокой.

Границы применимости формулы (10) напрямую связаны с содержанием Al в топливе. Очевидно, что если концентрация Al мала (ме-

нее $5 \div 10$ %), то среднемассовый диаметр частиц может и недорасти до предельного размера, так что ошибка будет велика. При высоком содержании Al (более 25 %) концентрация частиц может быть настолько значительной, что приведет к усилению влияния частиц друг на друга через газ (эффект стесненности в двухфазном течении [21]), а процессы аэродинамического дробления и коагуляции частиц будут сильно между собой конкурировать. Это может привести к завышению значения среднемассового диаметра частиц по сравнению с предельно допустимым размером.

Тем не менее во всех других случаях, где содержание Al не очень велико и не очень мало, что наиболее характерно для современных твердотопливных ракетных двигателей, формула (10) оказалась не хуже корреляционных зависимостей [7] (см. табл. 2). В отличие от них (10) является многопараметрической зависимостью и содержит 11 независимых физических параметров, которые легко вычисляются и задаются. Сопоставления теоретических расчетов с эмпирическими корреляциями [7] и экспериментальными данными [7, 8, 24] позволяют рекомендовать предложенную формулу для предсказания размеров частиц Al_2O_3 в выхлопных струях широкого класса ракетных двигателей на твердом топливе.

Автор выражает признательность профессору В. М. Фомину, по чьей инициативе была проведена первая часть работы, опубликованная в [23], а также профессору В. Е. Зарко, за ценные замечания и предложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Логачев В. С., Мальцев В. М. Горение металлизированных конденсированных систем. М.: ИХФ АН СССР, 1962.
2. Povinelli L. A., Rosenstein R. A. Aluminum size distributions from high-pressure composite solid-propellant combustion // AIAA Journal. 1964. V. 2, N 10.
3. Григорьев В. Г., Зарко В. Е., Куценогий К. П. Экспериментальное исследование агломерации частиц алюминия при горении конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 3–10.
4. 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. Р. 20–25.
5. Glotov O. G., Zarko V. E., Karasev V. V., and Beckstead M. W. Condensed combustion products of metalized propellants of variable formulation // AIAA Paper. N 98-0449. 1998. P. 7.
6. Salita M. Deficiencies and requirement in modeling of slag generation in solid rocket motors // J. Propulsion and Power. 1995. V. 11, N 1. P. 10–23.
7. Hermesen R. W. Aluminum oxide particle size for solid rocket motor performance prediction // J. Spacecraft and Rockets. 1981. V. 18, N 6. P. 483–490.
8. Laredo D., McCrorie II J. D., Vaghn J. K., Netzers D. W. Motor and plume particle size measurements in solid propellant micromotors // J. Propulsion and Power. 1994. V. 10, N 3. P. 410–418.
9. Kliegal J. R., Nickerson G. R. Flow of gas-particle mixtures in axially symmetric nozzles // Detonation and Two-Phase Flow. New York: Academic Press, 1962. P. 173–194.
10. Крайко А. Н., Стренин А. Е. К теории течения двухсторонней сплошной среды с твердыми или жидкими частицами // Журн. прикл. математики и механики. 1965. Т. 29, № 3. С. 418–429.
11. Marble F. E. Droplet agglomeration in rocket nozzles caused by particle slip and collision // Astronaut. Acta. 1967. V. 13, N 2. P. 159–166.
12. Crowe C. T., Willoughby P. G. A Study of particle growth in a rocket nozzle // AIAA Journal. 1967. V. 5, N 7. P. 1300–1304.
13. Гришин С. Д., Тишин А. П., Хайрутдинов Р. И. Неравновесное двухфазное течение в сопле Лавалья с коагулирующей частиц полидисперсного конденсата // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1969. № 2. С. 112–117.
14. Бабуха Г. Л., Стренин Л. Е., Шрайбер А. А. Расчет двухфазных потерь в соплах при наличии коагуляции и дробления капель конденсата // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1971. № 1. С. 175–177.
15. Стренин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974.
16. Кисаров Ю. Ф., Липанов А. М. Расчет параметров двухфазного течения в осесимметричном сопле Лавалья с учетом коагуляции и дробления частиц // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 4. С. 161–166.
17. Газовая динамика двухфазных течений в соплах / И. М. Васенин, В. А. Архипов, В. Г. Бутов и др. Томск: ТГУ, 1986.
18. Рычков А. Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988.
19. Vasenin I. M., Narimanov R. K., Glazunov A. A., et al. Two-phase flows in the nozzles of solid rocket motors // J. Propulsion and Power. 1995. V. 11, N 4. P. 583–592.

20. **Bondarchuk S. S., Vorozhtsov A. B., Kozlov E. A., et al.** Analysis of multidimensional and two-phase flows in solid rocket motors // J. Propulsion and Power. 1995. V. 11, N 4. P. 593–599.
21. **Яненко Н. Н., Солоухин Р. И., Папырин А. Н., Фомин В. М.** Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. Новосибирск: Наука, 1980.
22. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. Ч. 1, 2. М.: Наука, 1987.
23. **Ковалев О. Б., Фомин В. М.** Аналитическое исследование течения двухфазной смеси в сопле с учетом газодинамического дробления // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 5. С. 83–89.
24. **Sambamurthi J. K.** Al₂O₃ collection and sizing from solid rocket motor plumes // J. Propulsion and Power. 1996. V. 12, N 3. P. 598–604.

*Поступила в редакцию 6/VII 2001 г.,
в окончательном варианте — 10/IV 2002 г.*
