

ЭФФЕКТЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ РДТТ

В. А. Архипов, А. С. Ткаченко, В. Ф. Трофимов

НИИ прикладной математики и механики при ТГУ, 634050 Томск

Исследовано влияние эффектов динамического взаимодействия на эволюцию спектра размеров частиц оксида алюминия и агломератов алюминия в камере сгорания твердотопливного ракетного двигателя. Представлены критериальные зависимости для определения характеристик массообмена при вращении частиц и их взаимодействии между собой и с газовым потоком.

Динамическое взаимодействие жидких частиц конденсированной фазы продуктов сгорания между собой и с газовым потоком, приводящее к их коагуляции и дроблению, оказывает существенное влияние на рабочий процесс в камере и сопловом блоке ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ). Детальные теоретические и экспериментальные исследования двухфазных течений в соплах с учетом взаимодействия частиц полидисперсного конденсата позволили разработать адекватные математические модели для прогнозирования интегральных характеристик сопла [1, 2]. Двухфазные течения в камере сгорания изучены гораздо меньше. В то же время внутрикамерные процессы играют определяющую роль в формировании исходного спектра размеров частиц на входе в сопло. Течение в камере отличается большой сложностью, так как кроме частиц оксида алюминия в продуктах сгорания содержатся горящие частицы алюминия и их агломераты, а функция распределения конденсированных частиц по размерам, как правило, полимодальна. Результаты численных исследований эволюции частиц — агломератов алюминия в камере РДТТ [3, 4] — показали актуальность этих работ, которая обусловлена сильной зависимостью интегральных характеристик двигателя от особенностей двухфазных течений с горением частиц в камере РДТТ. В большинстве известных работ динамическое взаимодействие частиц не учитывалось.

Цель настоящей работы — проанализировать влияние взаимодействия капель с газовым потоком и при столкновениях между собой в камере сгорания РДТТ на формирование спектра размеров частиц, основываясь на современных представлениях о физике этих процессов.

Будем рассматривать двухкомпонентную

гетерогенную среду, состоящую из частиц алюминия и оксида алюминия. Каждый из компонентов смеси имеет свою исходную функцию распределения частиц по размерам и, соответственно, свои средние размеры частиц. На данном этапе влияние горения частиц алюминия на взаимодействие не учитывается. Рассмотрим следующие процессы динамического взаимодействия капель.

1. Разрушение капель под действием газового потока (аэродинамическое дробление).

2. Дробление образовавшихся при столкновении вращающихся капель под действием центробежных сил.

3. Коагуляция и дробление при столкновениях капель одного сорта ($Al - Al, Al_2O_3 - Al_2O_3$).

4. Коагуляция и дробление при столкновениях капель разных сортов ($Al - Al_2O_3$).

Вследствие сложности этих процессов достоверную информацию о них можно получить только на основе экспериментальных исследований. Прямые измерения в камере сгорания не позволяют получить данные о взаимодействии реальных частиц. Это связано с жесткими условиями экспериментов (высокая температура и давление, мощное собственное излучение, высокая концентрация частиц в потоке). Поэтому одним из наиболее перспективных путей является установление необходимых закономерностей в условиях «холодных» продувок при соблюдении соответствующих требований физического моделирования.

Взаимодействие свободно летящих капель жидкости с газовым потоком и при столкновениях между собой определяется следующими безразмерными критериями [1, 2]:

1) $\gamma_{ji} = D_i/D_j$ — отношение диаметров взаимодействующих капель ($D_i > D_j$);

2) $H_{ji} = \eta_j / \eta_i$ — отношение коэффициентов динамической вязкости жидкостей;

3) $Lp_i = \sigma_i \rho_i D_i / \eta_i^2$ — критерий Лапласа;

4) $We = \rho_g D |u - v|^2 / \sigma$ — критерий Вебера;

5) $Re_{ji} = \rho_i D_j |v_j - v_i| / \eta_i$ — критерий Рейнольдса;

6) $\Omega = |M| [(D_0/2)^{3,5} \sqrt{\rho \sigma}]^{-1}$ — безразмерный момент импульса сталкивающихся капель. Здесь u, ρ_g — вектор скорости и плотность газа; v, ρ, σ — вектор скорости, плотность и коэффициент поверхностного натяжения частиц; индексы i, j относятся соответственно к параметрам капли-«мишени» и капли-«снаряда»; $D_0 = (D_i^3 + D_j^3)^{1/3}$ — диаметр эквивалентной (по объему) капли; $|M| = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} |v_j - v_i| \delta_{ji}$ — угловой момент сталкивающихся капель массой m_i, m_j ; δ_{ji} — прицельное расстояние, связанное с углом столкновения θ зависимостью $\delta_{ji} = ((D_i + D_j)/2) \sin \theta$.

Параметр H_{ji} существен при взаимодействии капель жидкости, физические свойства которых различны; критерий Рейнольдса в данном случае записан для модели движения капли-«снаряда» внутри капли-«мишени».

Для описания перечисленных выше процессов динамического взаимодействия капель модельных жидкостей в ряде работ предложены экспериментально полученные эмпирические формулы, справедливые в определенных диапазонах изменения параметров подобия. Анализ теоретических и экспериментальных исследований [5–8] показывает, что основным параметром, определяющим поведение капли в газовом потоке, является критерий Вебера. Принято считать, что дробление капли происходит при достижении некоторого критического значения We_* . Накопленные к настоящему времени данные не позволяют достаточно надежно описать механизмы взаимодействия капли с потоком газа, потери устойчивости и дробления. В обзорах [5, 6] в качестве наиболее надежных предложены значения $We_* = 3,5 \div 14,0$ (внезапный ввод капли в поток) и $We_* = 15 \div 24$ (постоянное нарастание скорости газа). В работе [6] с помощью обращенного варианта ударно-волнового метода диапазон We_* для плавно ускоряющегося потока увеличен до значений $We_* = 20 \div 30$. На практике наиболее часто используются значения $We_* = 17$ [8] для частиц оксида алюминия и $We_* = 28$ [7] для агломератов алюминия. Поскольку надежные данные о фракционном составе осколков, образующихся при аэродина-

мическом разрушении капли отсутствуют, общепринято допущение о том, что при достижении критического значения We_* исходная капля дробится на две вторичные с равной массой.

При столкновении капель близких размеров возможно разрушение первоначально слившейся капли вследствие вращения, вызванного действием центробежных сил. Впервые этот механизм дробления был экспериментально обнаружен в работе [9], где получено критическое значение безразмерного момента импульса $\Omega_* = 6,0 \pm 0,9$, разделяющее области слияния и дробления вращающихся капель.

Для описания массообмена сталкивающихся капель в двухфазном потоке целесообразно использовать некий интегральный параметр, в качестве которого в подавляющем большинстве отечественных работ принят параметр коагуляции и дробления φ_{ji} , предложенный в [10]. Величина φ_{ji} представляет собой математическое ожидание отношения изменения массы капли-«мишени», вызванное взаимодействием ее с каплями-«снарядами», к общей массе столкнувшихся с ней капель-«снарядов». Отметим, что во многих расчетных исследованиях неравновесных двухфазных течений в соплах коагуляция частиц либо не учитывалась, либо учитывалась в рамках весьма произвольных допущений (слияние капель при каждом столкновении).

Наиболее существенный вклад в определение интегральных характеристик массообмена капель применительно к задачам расчета двухфазных потерь удельного импульса в соплах твердотопливных двигателей внесли многолетние исследования Института технической теплофизики АН УССР (г. Киев) и НИИ прикладной математики и механики (г. Томск), подробный обзор которых приведен в [11]. Количественной характеристикой массообмена капель при столкновениях, как отмечено выше, является параметр φ_{ji} : $\varphi_{ji} > 0$, если преобладает процесс коагуляции, и $\varphi_{ji} < 0$ при преобладании процесса дробления. Для определения параметра φ_{ji} в [1] получена эмпирическая зависимость

$$\varphi_{ji} = 1 - 0,246 Re_{ji}^{0,407} Lp_i^{-0,096} \gamma_{ji}^{-0,278}, \quad (1)$$

справедливая в области параметров $30 < Re_{ji} < 6000$, $5 < Lp_i < 3 \cdot 10^5$, $1,9 < \gamma_{ji} < 12$.

Опытные данные по массообмену при столкновениях капель близких размеров ($\gamma_{ji} = 1,1 \div 3,0$) [2] показали, что в этом случае формула (1) завышает значения φ_{ji} . Обработкой

опытных данных [1, 12] получена обобщенная зависимость [13]:

$$\varphi_{ji} = 1,4 - 1,979\lambda_{ji} + 0,507(2\lambda_{ji}^2 - 1), \quad (2)$$

где

$$\lambda_{ji} = \left(\frac{Re_{ji}}{383,6}\right)^{0,572} \left(\frac{Lp_i}{370,4}\right)^{-0,153} \left(\frac{\gamma_{ji}}{2,37}\right)^{-0,597},$$

$$6 < Re_{ji} < 385, \quad 0,2 < Lp_i < 600,$$

$$1 < \gamma_{ji} < 12, \quad \lambda_{ji} \leq 1.$$

Столкновение частиц в камере сгорания сопровождается обдувом капель газовым потоком. С учетом этого явления в [14] получена уточненная зависимость:

$$\varphi'_{ji} = \begin{cases} \varphi_{ji} - 0,00446B_{ji}, \\ B_{ji} = Re_{ji}^{0,285} Lp_i^{0,2} \gamma_{ji}^{0,4} We_i^{0,442} \leq 40,6, \\ \varphi_{ji} - 11,9(B_{ji}/100)^{4,64}, \\ 40,6 < B_{ji} < 120, \end{cases} \quad (3)$$

справедливая в области параметров

$$30 < Re_{ji} < 500, \quad 8 < Lp_i < 10^3,$$

$$2,5 < \gamma_{ji} < 10, \quad We_i < 12,5.$$

Для взаимодействия капель разнородных жидкостей в работе [15] получена зависимость

$$\varphi'_{ji} = \varphi_{ji} + 0,0785|P|^{-1,05}|K|^{1,3}|\ln H_{ji}|^{1,96}\gamma_{ji}^{-0,51} \times \text{sgn } P \text{sgn } K \text{sgn } (\ln H_{ji}) \quad (4)$$

для области параметров $Re_{ji} < 8 \cdot 10^3$, $Lp_i < 4 \cdot 10^5$, $2 < \gamma_{ji} < 6$, $0,01 < H_{ji} < 250$. Здесь $P \equiv \ln(Lp_i/(5 \cdot 10^4))$, $K \equiv \ln(Re_{ji}/3150)$.

Проведем анализ двухфазного течения в канале твердотопливного заряда с точки зрения процессов динамического взаимодействия конденсированных частиц. Как отмечено выше, в канале движутся частицы алюминия и оксида алюминия с разными размерами, скоростями и физическими свойствами.

Анализ экспериментальной информации по дисперсности конденсата в камере сгорания [4] показывает, что результаты отбора проб, проведенных в различных условиях и с использованием различных методик, позволяют оценить лишь диапазоны изменения размеров частиц. Для частиц оксида алюминия $D = 0,1 \div 20$ мкм (среднемассовый диаметр $D_{43} \approx 2 \div 5$ мкм), для агломератов алюминия

Компонент	ρ , кг/м ³	η , Па·с	σ , Н/м
Al	2400	$6,35 \cdot 10^{-3}$	0,84
Al ₂ O ₃	3060	$60 \cdot 10^{-3}$	0,70
Газовая фаза	5,88	$6,7 \cdot 10^{-5}$	—

$D = 1 \div 1000$ мкм ($D_{43} \approx 100$ мкм). Физические параметры алюминия и оксида алюминия применительно к условиям в камере сгорания РДТТ приведены в таблице.

Рассмотрим двухфазное течение в канале твердотопливного заряда длиной L и площадью сечения F . Скорость газа u вдоль канала линейно возрастает от нуля вблизи переднего торца двигателя ($x = 0$) до значения $u_{вх}$ на входе в сопло ($x = L$). Для оценки $u_{вх}$ можно использовать соотношение

$$u_{вх} = \lambda_{вх} \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0},$$

где k , R — показатель адиабаты и газовая постоянная продуктов сгорания, T_0 — температура торможения, а значение приведенной скорости на входе в сопло $\lambda_{вх}$ определяется с помощью газодинамической функции приведенной плотности потока массы $q(\lambda) = F_{кр}/F$ ($F_{кр}$ — площадь критического сечения сопла). В рассматриваемом течении градиент скорости газа вдоль оси x постоянен: $\dot{u}_x = u_{вх}/L = \text{const}$.

Уравнение движения сферической частицы имеет следующий вид:

$$\tau v(x) \frac{dv(x)}{dx} = f_D [u(x) - v(x)], \quad (5)$$

где $\tau = \rho D^2 / 18\eta_g$ — характерное время релаксации количества движения, $f_D = C_D Re / 24$ — функция сопротивления, $Re = \rho_g(u - v)D / \eta_g$.

Для оценки влияния аэродинамического дробления частиц численно решалось уравнение (5) с граничным условием $v(0) = 0$. При этом использовалась неявная (по правой части) разностная схема. Рассматривалось линейное распределение скорости газа $u(x) = \dot{u}_x x$ вдоль канала. Значения градиента скорости в канале варьировались в диапазоне $\dot{u}_x = 50 \div 200$ с⁻¹, характерном для условий течения в канале твердотопливного заряда. Наибольшее значение \dot{u}_x соответствует начальной геометрии заряда; по мере выгорания диаметр канала увеличивается и, соответственно, величина градиента скорости уменьшается.

Функцию сопротивления f_D определяли по зависимости, учитывающей разреженность,

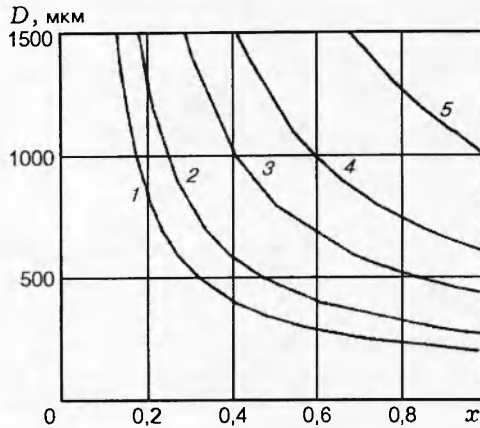


Рис. 1. Условия достижения критического значения $We_* = 17$ для агломератов алюминия в канале:

$\dot{u}_x = 200$ (1), 150 (2), 100 (3), 75 (4), 50 c^{-1} (5)

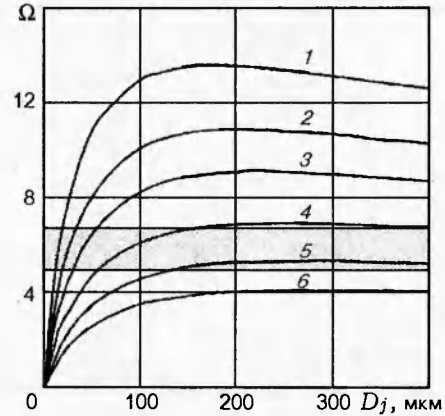


Рис. 2. Зависимость безразмерного момента импульса от диаметра капли-«снаряда»:

$\gamma_{ji} = 4$ (1), 3 (2), 2,5 (3), 2 (4), 1,7 (5), 1,5 (6); затененная область — граница, разделяющая области дробления и слияния капель ($\dot{u}_x = 6,0 \pm 0,9$)

сжимаемость и инерционность [11]:

$$f_D(Re, M) = (1 + 0,15 Re^{0,687}) \left[1 + \exp \left(-\frac{0,427}{M^{4,63}} - \frac{3,0}{Re^{0,88}} \right) \right] / \left\{ 1 + \frac{M}{Re} \left[3,82 + 1,28 \exp \left(-1,25 \frac{Re}{M} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

где M — число Маха в движении газа относительно частиц.

Результаты расчетов для агломератов алюминия представлены на рис. 1 для $L = 2$ м. Каждая из этих кривых определяет условия аэродинамического дробления частицы при достижении критического значения числа Вебера $We_* = 17$. Так, например, при $\dot{u}_x = 75 c^{-1}$ (кривая 4) частица диаметром 1000 мкм достигнет скорости, соответствующей We_* , и раздробится на расстоянии $\bar{x} = x/L = 0,6$. При $\bar{x} < 0,6$ для этой частицы $We < We_*$, и дробление не происходит. При $\dot{u}_x = 50 c^{-1}$ (кривая 5) эта же частица раздробится на расстоянии $x = 1$. Частицы диаметром менее 200 мкм при рассмотренных значениях \dot{u}_x дробиться не будут, так как критическое значение числа Вебера не достигается на всей длине канала.

Из рис. 1 следует, что чем выше значения градиента \dot{u}_x , тем ближе от начального сечения канала происходит аэродинамическое дробление частиц заданного диаметра. Если градиент скорости газа задан, то чем меньше размер частиц, тем дальше от входа в канал достигается условие дробления $We = We_*$.

Для оценки влияния вращения частиц проведены расчеты безразмерного момента импульса сталкивающихся капель

$$\Omega = \frac{4\pi}{9} \sqrt{2We_{ji}} \frac{\gamma_{ji}^3 (1 + \gamma_{ji})}{(1 + \gamma_{ji}^3)^{13/6}}, \quad (7)$$

где $We_{ji} = (D_j \rho / \sigma) |v_j - v_j|$ — «столкновительное» число Вебера.

При выводе (7) в качестве прицельного расстояния брали его наиболее вероятное значение [2]

$$\delta_{ji} = (D_i + D_j) / 3.$$

Расчеты проводили для агломератов алюминия; скоростное запаздывание частиц определяли численным решением уравнения (5) для пары частиц соответствующих размеров. Результаты расчетов для условий на входе в сопло ($L = 2$ м) при $\dot{u}_x = 100 c^{-1}$ представлены на рис. 2 в виде зависимости Ω от параметра γ_{ji} и диаметра наименьшей капли D_j . Анализ рис. 2 показывает, что если $D_j < 10$ мкм, то $\Omega < \Omega_*$ и дробления не происходит для всех рассмотренных значений $\gamma_{ji} = 1,5 \div 4$. Для частиц близких размеров ($\gamma_{ji} < 2$) $\Omega < \Omega_*$ и преобладают процессы слияния во всем диапазоне D_j . При столкновениях частиц алюминия с $\gamma_{ji} > 2$ достигаются высокие значения момента импульса $\Omega > 7$, что ведет к дроблению капель под действием центробежных сил.

Результаты расчетов параметра коагуляции и дробления φ_{ji} в сечении $x = L$ ($L = 2$ м,

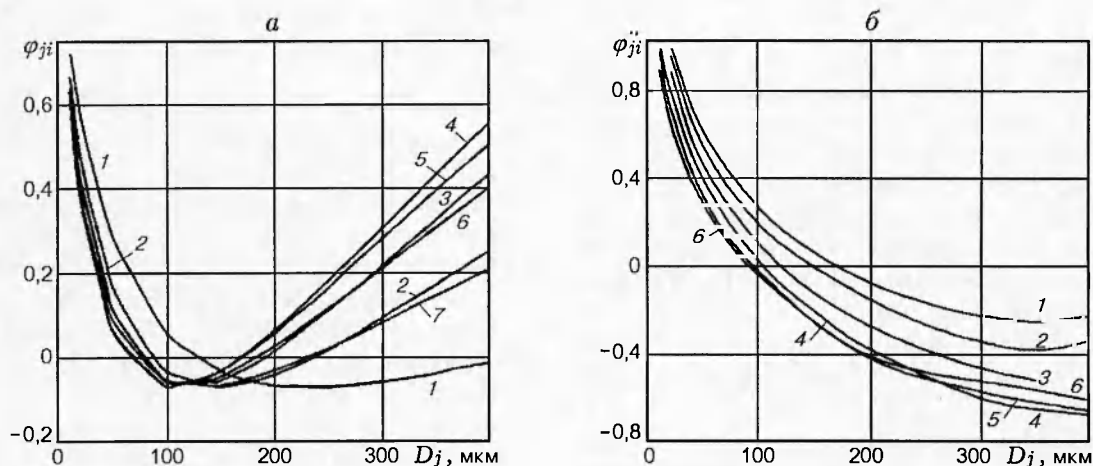


Рис. 3. Параметр коагуляции и дробления:

a — взаимодействие Al — Al: $\gamma_{ji} = 1,2$ (1), 1,4 (2), 1,6 (3), 2 (4), 2,5 (5), 3 (6), 4 (7); *б* — взаимодействие Al — Al₂O₃: $\gamma_{ji} = 2$ (1), 2,2 (2), 2,5 (3), 3 (4), 4 (5), 6 (6)

$\dot{u}_x = 100 \text{ с}^{-1}$) представлены на рис. 3. Расчеты проводили по зависимости (2) для столкновения агломератов алюминия (см. рис. 3, *a*) и по зависимости (4) — для столкновения частиц оксида алюминия с агломератами алюминия (см. рис. 3, *б*). Анализ представленных результатов показывает, что в камере РДТТ преобладает слияние частиц ($\varphi_{ji} > 0$). Характер зависимости $\varphi_{ji}(D_j)$ аналогичен для всех рассмотренных значений $\gamma_{ji} = 1,2 \div 4$; минимальное значение $\varphi_{ji} \approx -0,15$ достигается для частиц размером $D_j = 100 \div 150 \text{ мкм}$.

Сравнение результатов, представленных на рис. 3, показывает, что учет различия физических свойств сталкивающихся капель существенно влияет на количественные характеристики массообмена. При проведении расчетов проверялось выполнение условий попадания определяющих процесс критериев подобия в допустимые диапазоны соответствующих аппроксимационных формул.

ВЫВОДЫ

1. При дозвуковом течении в камере сгорания РДТТ проявляются все основные эффекты динамического взаимодействия конденсированных частиц алюминия и его оксида — аэродинамическое дробление, вращение, коагуляция и дробление при взаимных столкновениях.

2. Степень влияния этих эффектов на формирование спектра размеров частиц тем сильнее, чем крупнее исходные агломераты и чем

выше значение градиента скорости газа в тракте двигателя.

3. Аэродинамическое дробление в канале заряда для частиц диаметром менее 200 мкм не существенно. При столкновениях частиц в камере превалируют процессы слияния.

4. Характер зависимостей $\varphi_{ji}(D_j, \gamma_{ji})$ и $\varphi_{ji}''(D_j, \gamma_{ji})$ сложный, и принятые в ряде работ допущения о полном слиянии капель при их взаимодействии ($\varphi_{ji} = 1$) или об отсутствии массообмена между ними ($\varphi_{ji} = 0$) не обоснованы и могут привести к грубым ошибкам при расчете двухфазных течений в камере сгорания.

5. Существующие эмпирические зависимости для характеристик массообмена капель при столкновениях по диапазонам критериев подобия применимы к условиям в камере сгорания и могут быть рекомендованы для использования в численных моделях расчета внутрикамерных процессов РДТТ. Приведенные в статье результаты можно использовать для оценки влияния эффектов динамического взаимодействия частиц.

6. Для более точного прогнозирования эволюции спектра размеров конденсированных частиц необходимы дополнительные экспериментальные исследования по определению характеристик взаимодействия капель с учетом их горения, а также уточнение исходных данных по дисперсному и химическому составу агломератов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стернин Л. Е., Маслов Б. Н., Шрайбер А. А., Подвысоцкий А. М. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1980.
2. Газовая динамика двухфазных течений в соплах // И. М. Васенин, В. А. Архипов, В. Г. Бутов и др. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986.
3. Вилюнов В. Н., Ворожцов А. Б., Фещенко Ю. В. Моделирование двухфазного течения смеси газа с горящими частицами металла в полужамкнутом канале // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 24, № 3. С. 39–43.
4. Численный эксперимент в теории РДТТ // А. М. Липанов, В. П. Бобрышев, А. В. Алиев и др. Екатеринбург: Наука, 1994.
5. Гонор А. Л., Ривкинд В. Я. Динамика капли // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ, 1982. С. 86–159.
6. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Поленов А. Н. Разрушение капель жидкости в волнах разрежения // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1986. № 1. С. 165–168.
7. Кавени Л., Гани А. Дробление агломератов алюминия и окиси алюминия в ускоряющемся потоке // Ракет. техника и космонавтика. 1979. Т. 17, вып. 12. С. 76–80.
8. Корсунов Ю. А., Тишин А. П. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях числа Рейнольдса // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1971. № 2. С. 182–186.
9. Архипов В. А., Бушланов В. П., Васенин И. М. и др. Равновесные формы и устойчивость вращающихся капель // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1982. № 4. С. 13–20.
10. Соловьев А. Д. Слияние капель жидкости при соударениях // Тр. Центр. аэролог. обсерватории. 1969. № 89. С. 3–15.
11. Шрайбер А. А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники. Комплексные и специальные разделы механики. М.: ВИНТИ, 1988. Т. 3. С. 3–80.
12. Архипов В. А., Васенин И. М., Трофимов В. Ф. Энергомассообмен при столкновениях частиц в двухфазных потоках // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Харьков, 1978. № 1. С. 3–7.
13. Архипов В. А., Бутов В. Г., Васенин И. М. и др. О влиянии взаимодействия капель близких размеров на скорость роста и запаздывания частиц конденсата в полидисперсных двухфазных потоках // ПМТФ. 1985. № 5. С. 90–94.
14. Подвысоцкий А. М., Солоненко А. Д. Экспериментальное исследование столкновения капель в условиях аэродинамического воздействия газового потока // Вопросы технической теплофизики. Киев, 1976. № 6. С. 77–80.
15. Подвысоцкий А. М., Шрайбер А. А., Климов В. Л. Исследование массопереноса при взаимодействии быстро движущихся капель жидкости с резко различающимися физическими свойствами // Конвективный теплоперенос. Киев: Наук. думка, 1982. С. 65–71.

*Поступила в редакцию 12/VIII 1994 г.,
в окончательном варианте — 5/V 1998 г.*