

УДК 532.529

Численное исследование влияния кристаллизации ультрадисперсных частиц оксида алюминия на энергетические характеристики РДТТ

Н.Н. Дьяченко, Л.И. Дьяченко

Томский государственный университет

E-mail: Dr.Dyachenko@gmail.com

Представлены результаты численного исследования многофазного течения с учетом коагуляции, дробления и кристаллизации частиц полидисперсного конденсата в соплах ракетного двигателя твердого топлива. Показано влияние кристаллизации частиц на энергетические характеристики двигателя.

Ключевые слова: многофазное течение, функция распределения, коагуляция, дробление, кристаллизация, ультрадисперсный ансамбль частиц.

При сгорании металлизированного топлива образуется смесь газа и частиц оксидов металлов. По мере движения продуктов сгорания по соплу их температура падает и при достижении значения, равного температуре плавления материала частиц конденсированной фазы, возможен процесс кристаллизации. В работах [1–7] рассматриваются течения с учетом кристаллизации. Авторы работ [5, 6] на основе полученных результатов делают вывод, что на данном этапе развития ракетной техники влияние кристаллизации частиц на энергетические характеристики двигателя можно не учитывать. К настоящему времени разработаны математические модели, которые включают более широкий спектр физических явлений, сопровождающих многофазные течения, получены более точные теплофизические характеристики для частиц конденсированной фазы. Кроме этого, в настоящее время прослеживается тенденция к использованию в топливах ультра- и нанодисперсных порошков металлов [8]. Эти обстоятельства усиливают интерес к дальнейшему изучению многофазных течений и, в частности, с учетом кристаллизации ультрадисперсных частиц конденсированной фазы.

Настоящая работа посвящена численному исследованию влияния кристаллизации частиц оксида алюминия на энергетические характеристики ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ). Постановка задачи в части течения продуктов сгорания металлизированного топлива в сопле РДТТ, но без учета кристаллизации частиц жидкой фазы аналогична постановке, представленной в работах [9, 10]. Система уравнений, описывающая двухфазное течение с учетом коагуляции и дробления частиц конденсата, заимствована из работы [11].

Когда температура частиц соответствующей фракции понижается до 0,8 температуры плавления, частицы кристаллизуются. В уравнение энергии частиц добавляется скрытая теплота плавления, равная $n_i u_i q_{пл} (dm_i / dx)$, здесь n_i, u_i — число и скорость частиц

i -ой фракции, dm_i/dx — откristаллизовавшаяся масса, $q_{пл}$ — теплота плавления. Процесс кристаллизации рассчитывается по модели Хендерсона [2].

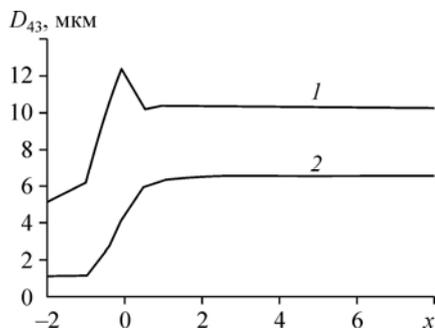
Система уравнений решалась на основе обратной задачи. Для численного интегрирования системы уравнений газа использовался стационарный аналог нецентральной конечно-разностной схемы Мак–Кормака [12] второго порядка точности. Интегрирование системы уравнений фракции частиц осуществлялось с помощью неявной разностной схемы [13], имеющей также второй порядок точности. Во входном сечении использовалось условие скоростного и температурного равновесия между газовой фазой и частицами. Квадраты моментов вращения частиц на входе для всех фракций полагались нулевыми.

Течение рассчитывалось в квазиодномерной постановке для модельного радиусно-профилированного сопла [7]. Радиус скругления в горловине сопла $r = r^*$ (r^* — радиус минимального сечения сопла), угол поджатия в дозвуковой области $\alpha_1 = 45^\circ$, углы поджатия, описывающего сверхзвуковую область, $\alpha_2 = 24^\circ$ и $\alpha_3 = 7^\circ$, степень расширения сопла $Y_a = r_a / r^*$ (r_a — радиус сопла на срезе).

Расчеты проводились при следующих значениях исходных параметров: $T_k = 3200$ К, $P_k = 5,8 \cdot 10^6$ Па, $r^* = 0,2$ м, $\mu = 0,89 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻¹·с⁻¹, $R = 300$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $N = 10$, $T_{пл} = 2327$ К, $q_{пл} = 1149,7$ Кдж/кг, расширение сопла Y_a изменялось от 6 до 10, весовая доля конденсата $z = 0,4$.

Непрерывная функция распределения частиц по размерам на входе в сопло задавалась в виде нормально-логарифмического закона с параметрами r_0 (средний радиус частиц) и σ (дисперсия). Для мелкодисперсного состава частиц $r_0 = 1,43$ мкм, для ультрадисперсного $r_0 = 0,3$ мкм, дисперсия $\sigma = 1,5$. Взаимодействие жидких и твердых частиц между собой не учитывается (обоснование этому будет дано ниже). Дробление частиц определяется двумя механизмами: взаимодействием с газом и взаимодействием между собой. При достижении числом Вебера (We) критического значения, равного 17, и критического момента вращения M , равного 4, частица дробится [9].

На рис. 1 представлены результаты расчетов среднемассового размера частиц D_{43} вдоль сопла, средний радиус частиц на входе в сопло r_0 принимался равным 1,43 и 0,3 мкм. При $r_0 = 1,43$ мкм в области минимального сечения сопла наблюдается интенсивный рост частиц за счет коагуляции. Дробление в дозвуковой части сопла определяется взаимодействием частиц с газом (числом Вебера), в трансзвуковой и начале сверхзвуковой области сопла механизм дробления определяется вращением частиц (моментом вращения). Начиная с сечения сопла $x = 1,85$ частицы не дробятся, т.к. момент вращения не достигает своего критического значения. Среднемассовый размер D_{43} устанавливается на постоянной величине ($D_{43} = 10,34$ мкм) начиная с сечения $x \approx 2$, при этом раз-



меры частиц всех фракций являются постоянными вниз по соплу. Постоянство размеров частиц фракций свидетельствует о том, что, начиная с сечения $x = 1,85$, в потоке не происходит столкновений частиц. Отсутствие столкновений частиц в сверхзвуковой части сопла

Рис. 1. Изменение среднемассового размера частиц D_{43} вдоль сопла.

$T_k = 3200$ К, $r_0 = 1,43$ (1), $r_0 = 0,3$ (2) мкм.

Таблица

Радиусы частиц в зоне кристаллизации, координаты начала и завершения кристаллизации частиц

$r_0 = 1,43$ мкм; $Y_a = 10$			$r_0 = 0,3$ мкм; $Y_a = 10$		
№ фракции	Радиус частиц, мкм	Диапазон кристаллизации, x	№ фракции	Радиус частиц, мкм	Диапазон кристаллизации, x
1	0,585	2,937–3,169	1	0,170	2,767–2,944
2	1,157	3,083–3,559	2	0,311	2,867–3,000
3	1,773	3,260–4,000	3	0,474	2,890–3,083
4	2,590	3,559–4,348	4	0,712	2,944–3,262
5	3,754	4,134–5,841	5	1,091	3,000–3,458
6	5,279	5,000–7,622	6	1,671	3,170–3,915
7	5,569	5,192–7,900	7	2,459	3,458–4,592
8	5,231	4,908–7,305	8	3,349	3,792–5,405
9	6,172	5,612 — не окончена	9	4,171	4,279–6,257
10	5,456	5,190–7,722	10	4,854	4,763–7,000

($x \geq 1,85$) обусловлено выравниванием скоростей газа и частиц, уменьшением концентрации частиц за счет расширения сопла, малым временем пребывания частиц в сопле (время пребывания частиц в сопле составляет порядка 10^{-5} с, а время между столкновениями — $\sim 10^{-4}$). Данные обстоятельства позволяют в зоне кристаллизации частиц рассматривать задачу в рамках двухфазной среды, так как нет взаимодействий между жидкой и твердой фазами, а расчеты параметров течения проводятся по схеме двухфазного потока без учета коагуляционных членов в системе уравнений.

Для ультрадисперсного ансамбля частиц ($r_0 = 0,3$ мкм) в районе критического сечения сопла также наблюдается интенсивный рост среднемассового размера. Значения числа Вебера и момента вращения не достигают своих критических значений вдоль всего сопла. Изменение среднемассового размера обусловлено только процессом коагуляции (это совпадает с выводами работы [11]). Начиная с сечения $x = 2,1$ устанавливаются постоянные значения среднемассового размера ($D_{43} = 6,45$ мкм) и размеров частиц каждой фракции. Как и в случае мелкодисперсного ансамбля частиц, это обосновывает проведение в зоне кристаллизации расчетов в рамках двухфазной среды по упрощенной схеме (без учета коагуляционных членов). Результаты расчета радиусов частиц в зоне кристаллизации, координаты начала и завершения кристаллизации частиц каждой фракции представлены в таблице. При мелкодисперсном составе ($r_0 = 1,43$ мкм) частицы девятой фракции за время пребывания в сопле не успевают завершить процесс кристаллизации. Частицы ультрадисперсного состава ($r_0 = 0,3$ мкм) за время пребывания в сопле полностью кристаллизуются.

На рис. 2 представлены профили температур частиц 1, 9, 10 фракций вдоль сопла (штриховые линии соответствуют расчету без учета кристаллизации, сплошные — с учетом). Расчеты проведены при $r_0 = 0,3$ мкм. После начала кристаллизации температура частиц возрастает, затем снижается. Значения пиковых температур с увеличением радиуса частиц увеличивается. Это связано с тем, что с ростом размера частиц увеличивается, с одной стороны, количество тепла, выделенного частицей за счет кристаллизации внутрь частицы, а с другой стороны, увеличивается отток тепла в газ за счет конвективного

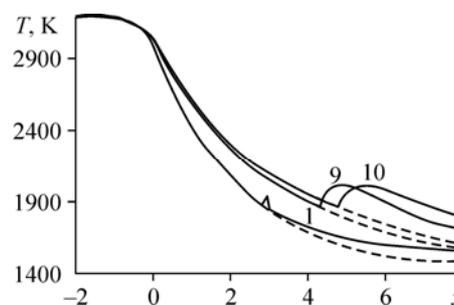


Рис. 2. Температурные профили частиц 1, 9, 10 фракций вдоль сопла.

$$T_k = 3200 \text{ K}, r_0 = 0,3 \text{ мкм}, Y_a = 10.$$

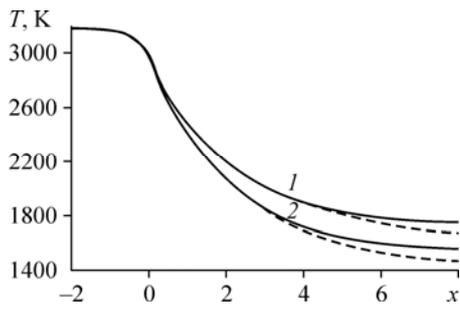


Рис. 3. Изменение температуры газа вдоль сопла.
 $T_k = 3200$ К, $r_0 = 0,3$ мкм, $Y_a = 6$ (1), 10 (2).

теплообмена. Влияние первого фактора больше, это и приводит к росту пиковых значений температуры. Профили температуры с укрупнением частиц становятся более пологими, что связано с уменьшением коэффициента теплоотдачи вдоль сопла.

На рис. 3 показано изменение температуры газа вдоль сопла. Расчеты проведены при $r_0 = 0,3$ мкм с расширением сопла $Y_a = 6$ и 10. Штриховые линии соответствуют расчету без учета кристаллизации частиц, сплошные линии — с учетом.

На рис. 4 представлены результаты численного расчета изменения величины удельного импульса от степени расширения сопла для ультрадисперсного (1) и мелкодисперсного (2) составов частиц. Вклад в изменение импульса в случае мелкодисперсного состава меньше, чем в случае ультрадисперсного. Это объясняется тем, что крупные частицы достигают температуры кристаллизации ближе к срезу сопла и, следовательно, вклад скрытой теплоты плавления этих частиц в работу расширения газа менее эффективен — из-за малого времени пребывания в сопле они не успевают полностью передать тепло в газ, процесс кристаллизации частиц девятой фракции не успевает закончиться. Численные результаты расчета изменения величины удельного импульса за счет кристаллизации в случае мелкодисперсного ансамбля частиц оксида алюминия согласуются с выводами, сделанными авторами работ [5, 6].

На рис. 5 представлены результаты расчетов изменения величины удельного импульса от расширения сопла в случае монодисперсного двухфазного потока. В качестве основного размера частиц брался среднемассовый размер в области кристаллизации (для ультрадисперсного — $D_{43} = 6,45$ мкм, мелкодисперсного — $D_{43} = 10,34$ мкм).

Для ультрадисперсного состава $D_{43} = 6,45$ мкм, что соответствует 8-ой фракции, а так как основная масса конденсата сосредоточена в 4–7 фракциях, то результат расчета оказывается завышенным по сравнению с полидисперсным представлением. В случае мелкодисперсного состава $D_{43} = 10,34$ мкм, что соответствует 6-ой фракции, основная масса частиц приходится на 6–10 фракции, поэтому результат расчета получается ниже по сравнению с полидисперсным представлением.

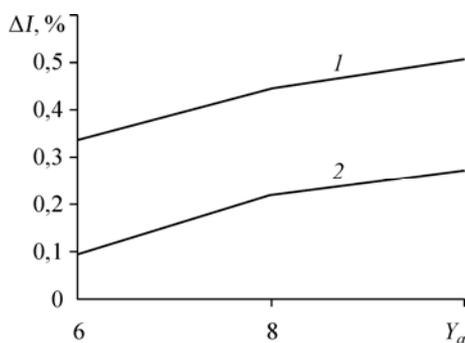


Рис. 4. Изменение удельного импульса ΔI от расширения сопла Y_a .
 $r_0 = 0,3$ (1), 1,43 (2) мкм; $T_k = 3200$ К.

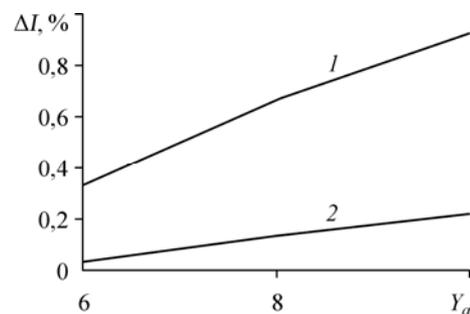


Рис. 5. Изменение удельного импульса ΔI от расширения сопла Y_a .
 $D_{43} = 6,45$ (1), 10,34 (2) мкм.

Кристаллизация мелкодисперсного состава ($r_0 = 1,43$ мкм) частиц оксида алюминия вносит незначительный вклад в изменение удельного импульса и, видимо, в большинстве случаев учитывать его не целесообразно. Вклад кристаллизации частиц ультрадисперсного состава ($r_0 = 0,3$ мкм) в разы больше, и его учет необходим. Положительный эффект уменьшения двухфазных потерь усиливается с уменьшением размера частиц, с увеличением длины и расширением сопла.

Результаты представленной работы могут быть полезны как при разработке топлива, так и при проектировании энергосистемы в целом.

Список литературы

1. Рейзер М.Ю., Струнин В.Н., Манелис Т.Б. О возможности кристаллизации конденсированных продуктов сгорания в соплах // Физика горения и взрыва. 1973. № 3. С. 363–369.
2. Хендерсон С.В. Влияние кинетики процесса кристаллизации на энергетические характеристики ракетного двигателя // РТК. 1977. Т. 15, № 4. С. 183–185.
3. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.
4. Волков В.А., Муслиев В.А., Пирумов У.Г. Математические модели кристаллизации частиц в двухфазных потоках // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 6. С. 77–84.
5. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 464 с.
6. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990. 366 с.
7. Цимбалюк А.Ф. Кристаллизация и плавление частиц окислов в сопле и неизобарической сверхзвуковой полидисперсной струе // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 32, № 2. С. 393–336.
8. Де Лука Л.Т., Галфетти Л., Северини Ф., Меда Л., Марра Ж., Ворожцов А.Б., Седой В.С., Бабук В.А. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 6. С. 80–94.
9. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд. ТГУ, 1986. 262 с.
10. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1994. 320 с.
11. Глазунов А.А., Дьяченко Н.Н., Дьяченко Л.И. Численное исследование течения ультрадисперсных частиц оксида алюминия в сопле ракетного двигателя твердого топлива // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 1. С. 81–88.
12. Пирумов У.Г. Расчет течения газа в соплах Лавала // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1967. № 5. С. 10–22.
13. Рычков А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 222 с.

*Статья поступила в редакцию 27 июня 2013 г.,
после переработки — 22 октября 2013 г.*