

УДК 551.510.536

КОНДЕНСАЦИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ВЫХЛОПНОЙ СТРУЕ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

© 2011 г. Ю. В. Платов¹, А. И. Семенов², Б. П. Филиппов¹

¹ Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, г. Троицк (Московская обл.).

² Учреждение РАН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, Москва
e-mail: yplatov@izmiran.ru; anasemenov@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.01.2010 г.

После доработки 30.11.2010 г.

Рассматривается процесс конденсации паров воды в выхлопной струе ракетного двигателя в условиях верхней атмосферы. Учитываются процессы нагрева частиц при выделении скрытой теплоты конденсации, радиационный нагрев и потери энергии на излучение. Из решения уравнений теплового баланса и баланса массы конденсирующихся частиц получены зависимости изменения температуры и размеров частиц от времени. В процессе конденсации толщина ледяного слоя на частицах может достигать $>70 \text{ \AA}$.

ВВЕДЕНИЕ

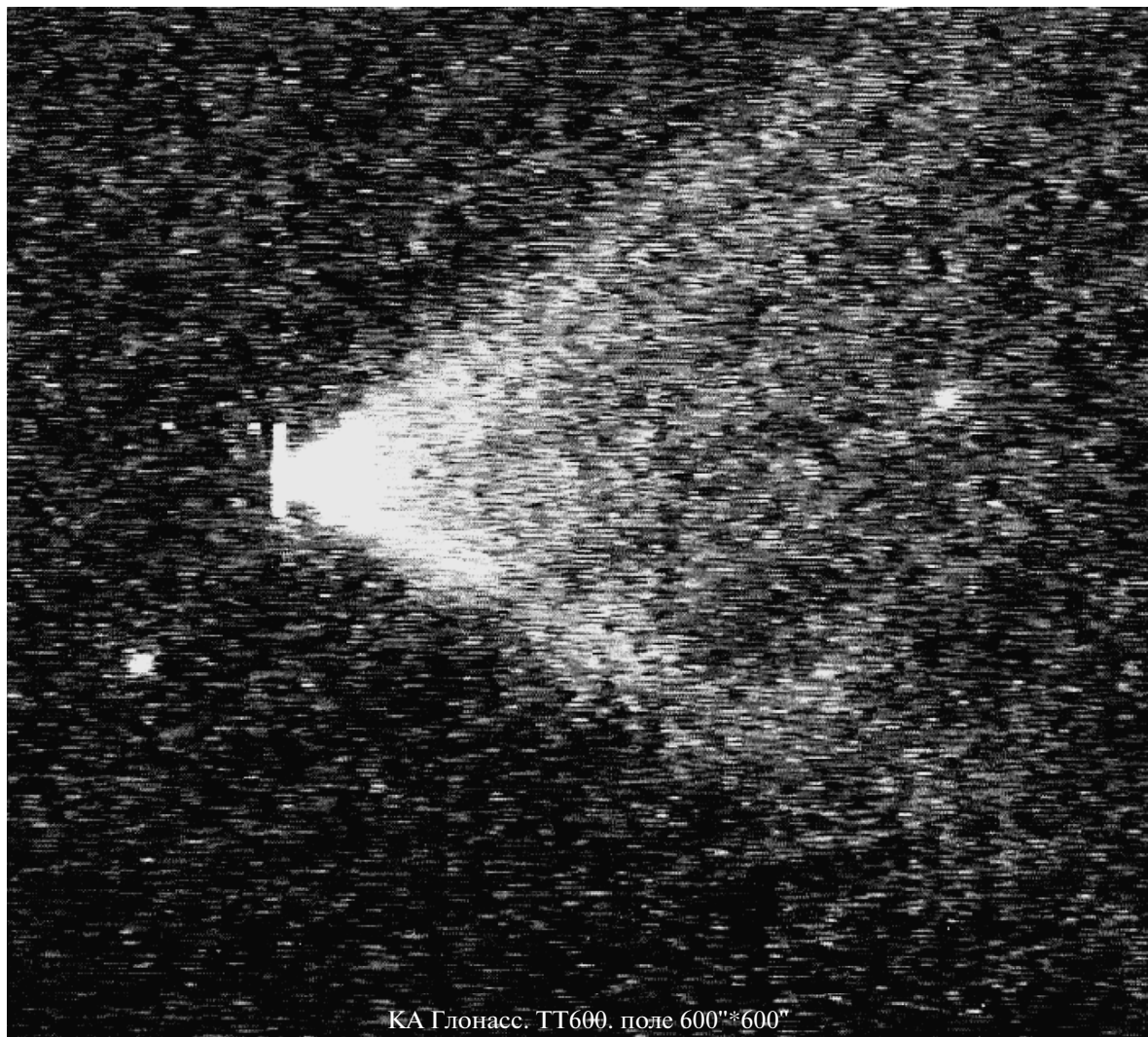
Интенсивность оптических явлений, развивающихся в верхней атмосфере, как правило, много меньше интенсивности явлений локализованных в приземных слоях атмосферы. Это, естественно, связано с тем, что плотность атмосферы на высотах 100–300 км в 10^7 – 10^{12} раз меньше плотности воздуха вблизи поверхности Земли. Вместе с тем масштаб явлений на больших высотах может во много раз превосходить размеры, характерные для тропосферных или стратосферных явлений и составляет сотни километров. Один из наиболее значимых механизмов развития оптических явлений в верхней атмосфере состоит в рассеянии солнечного света на дисперсных частицах естественного или техногенного происхождения.

Практически единственным механизмом образования искусственных газо-пылевых облаков в верхней атмосфере является выброс продуктов сгорания ракетных двигателей при запусках ракет или маневрировании космических аппаратов. Явления, связанные с работой ракетных двигателей в верхней атмосфере, наблюдаются в сумеречных условиях и, в зависимости от типа двигателей и режимов их работы, различаются по длительности их развития, динамике, масштабу и геометрическим характеристикам [Платов и др., 2003; Platov et al., 2004]. Наиболее важным фактором, определяющим интенсивность таких эффектов, является наличие дисперсных частиц в продуктах сгорания двигателей [Kung et al., 1975; Wu, 1975; Simmons, 2000; Ветчинкин и др., 1993]. Продукты сгорания твердотопливных двигателей всегда содержат зольные частицы (сажа, Al, Al₂O₃), состав которых определяется компонентами топлива. При работе жидкостных ракетных двигателей

дисперсные частицы могут образовываться практически только в результате конденсации паров воды и углекислого газа в выхлопной струе двигателей из-за резкого падения температуры продуктов сгорания при их расширении.

Наличие конденсированной фазы в продуктах сгорания при работе двигателей в условиях верхней атмосферы подтверждается многочисленными наблюдениями оптических эффектов, связанных с запусками ракет. На рис. 1 в качестве примера приведена фотография облака конденсированных частиц, образовавшегося при работе двигателя космического аппарата “Гюнасс” на высоте ~ 20000 км над поверхностью Земли.

Эволюция ледяных частиц, образующихся при конденсации продуктов сгорания в условиях верхней атмосферы, рассматривалась в работах [Platov and Kosch, 2003; Платов и др., 2005] вне зависимости от условий их образования. Конденсация паров воды в продуктах сгорания ракетных двигателей неоднократно рассматривалась разными авторами (наиболее подробно, вероятно, в работах [Kung et al., 1975; Wu, 1975; Воеуг, 1964]). Полученные оценки размеров ледяных частиц, образующихся при конденсации, составляют $\sim 17 \text{ \AA}$. В этих работах полагалось, что продукты конденсации находятся в тепловом равновесии с окружающей средой, что является скорее исключением, чем правилом для реальных условий. Действительно, скрытая теплота конденсации, приходящаяся на одну молекулу (δW_{con}), более чем на порядок превосходит среднюю кинетическую энергию молекул (δW_{kin}) в продуктах сгорания: $\delta W_{con} \approx 20 \delta W_{kin}$. При конденсации паров происходит нагрев частиц, и для поддержания их в тепловом равновесии с окружающим газом необходимо нали-



КА Глонасс. ТТ600. поле 600"*600"

Рис. 1. Облако дисперсных частиц, образовавшееся в результате конденсации паров воды в выхлопной струе двигателя космического аппарата “Глонасс”. Снимок получен в 2000 г. Характерный размер облака ~50 км.

чие интенсивного теплоотвода. В случаях, когда плотность среды, в которой происходит конденсация, достаточно велика и парциальное давление паров воды мало по сравнению с давлением продуктов сгорания в выхлопной струе, тепловое равновесие эффективно поддерживается путем теплообмена с окружающей средой. Однако, при работе ракетных двигателей, продукты сгорания которых на ~70% и более состоят из паров воды, скорость конденсации может уменьшаться на порядок величины из-за уменьшения эффективного коэффициента прилипания молекул воды к поверхности частиц и предположение о тепловом равновесии может оказаться несправедливым.

Целью настоящей работы является рассмотрение процесса конденсации паров воды в выхлопной струе двигателей на основе решения уравнений теплового баланса частиц и изменения их размеров с

учетом процессов радиационного нагрева и охлаждения частиц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В работе приняты следующие обозначения:

$l(t)$ – расстояние от сопла до области конденсации; t – время движения продуктов сгорания от сопла двигателя на расстояние $l(t)$; $T_v(t)$ – температура паров воды в выхлопной струе двигателя; T_p – температура конденсирующихся частиц; r – характерный размер (радиус) конденсирующихся частиц; ρ – плотность частиц; $q(T_p)$ – удельная теплоемкость частиц; Q_{con} – удельная теплота конденсации; α – коэффициент адаптации (прилипания) молекул воды к поверхности конденсата; $P_S(T_p)$ – давление насыщающих паров над поверхностью частиц; $P_v(t)$ – парциальное давление паров воды в

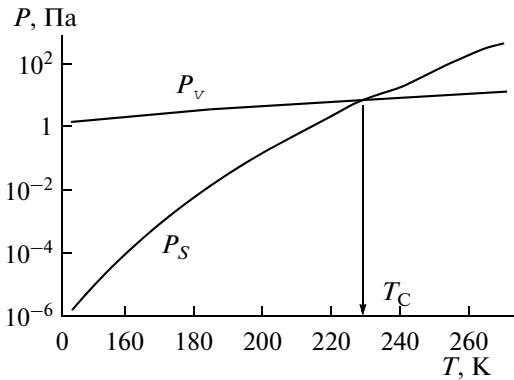


Рис. 2. Зависимость давления паров воды (логарифмическая шкала) в продуктах сгорания P_p и давления насыщающих паров воды P_s от температуры.

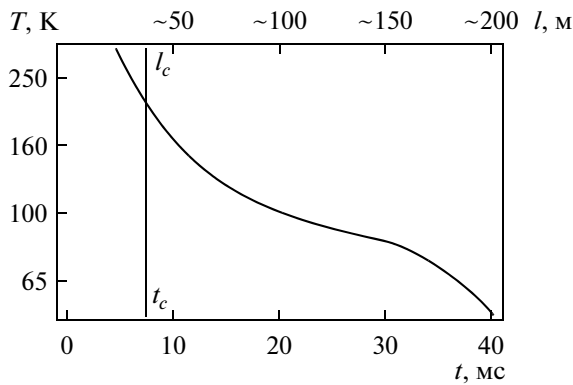


Рис. 3. Зависимость температуры продуктов сгорания (логарифмическая шкала) от времени (расстояния от сопла). t_c и l_c время и расстояние от сопла, начиная с которых возможна конденсация паров воды в продуктах сгорания.

выхлопной струе; $P(t)$ – давление продуктов сгорания в выхлопной струе; k – постоянная Больцмана; σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\chi(r, \lambda)$ – коэффициент поглощения излучения для воды; $B(\lambda, T)$ – функция Планка; $F_S(\lambda)$ – распределение энергии в спектре Солнца; S_N – площадь сопла двигателя; Q_{col} – коэффициент теплопередачи; μ – масса молекулы воды;

Динамика изменения температуры и размеров частиц конденсации описывается уравнениями теплового баланса и изменения размера частиц:

$$dW_p = Q_{con}dm + dW_{Sun} + dW_{Noz} + dW_{pl} - dW_{rad} - dW_{col},$$

$$dr = f(P, T, \rho)dt.$$

В этих уравнениях [Platov and Kosch, 2003; Платов и др., 2005] $dW_p = 4/3 \pi r^3 q(T_p) dT$ – изменение энергии конденсирующейся частицы; $Q_{con}dm =$

$= 4\pi r^2 Q_{con} \alpha [P_v(t) - P_s(T_p)] \sqrt{\mu/2\pi k T_v} dt$ – энергия, выделяемая в результате конденсации; $dW_{Sun} = \pi r^2 \int \chi(r, \lambda) F_S(\lambda) d\lambda$, $dW_{Noz} = \pi r^2 \frac{S_N}{2\pi l^2(t)} \times \int \chi(r, \lambda) B(T_N, \lambda) d\lambda$ – энергия солнечного излучения и излучения сопла двигателя, поглощаемая частицей соответственно;

$dW_{rad} = 4\pi r^2 \gamma \sigma T^4$ – потери энергии на тепловое излучение ($\gamma \approx 0.92$ – излучательная способность воды);

$dW_{col} = 4\pi r^2 \varepsilon (T_p - T_v) P(t)/P_0$ – потери энергии в результате теплоотдачи окружающему газу ($\varepsilon \approx 10500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ – коэффициент теплоотдачи конденсирующегося водяного пара при атмосферном давлении – P_0).

С учетом приведенных соотношений уравнения баланса представляются в следующем виде:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho q(T_p) dT_p = \{ 4\pi r^2 Q_{con} \alpha [P(t) - P_s(T_p)] \times \sqrt{\mu/2\pi k T_v} + \pi r^2 \int \chi(r, \lambda) F_S(\lambda) d\lambda + \pi r^2 \frac{S_N}{2\pi l^2(t)} \int \chi(r, \lambda) B(T_N, \lambda) d\lambda - 4\pi r^2 \times \int \chi(r, \lambda) B(T_p, \lambda) d\lambda - Q_{col}(T_{pv}, t) \} dt;$$

$$4\pi r^2 \rho dr = -4\pi r^2 [P(t) - P_s(T_p)] \sqrt{\mu/2\pi k T_v} dt. \quad (2)$$

Изменение температуры и давления в выхлопной струе ракетного двигателя при истечении продуктов сгорания в условиях верхней атмосферы (в вакуум) определяется параметрами потока на срезе сопла двигателя – давлением, температурой, плотностью газа и скоростью его истечения. В вычислениях использовались физические условия в выхлопной струе для центральной трубки тока, полученные интерполяцией данных, рассчитанных для конкретного двигателя (ракета носитель “Сатурн IVB”, двигатель Rocketdyne J-2), работающего на жидком водороде и кислороде [Wu, 1975].

Очевидно, что процесс конденсации может происходить только при условии $P_v(t) > P_{\infty}(T_p)$, которое начинает выполняться, начиная с некоторого критического значения температуры продуктов сгорания (T_c), что соответствует расстоянию l_c от сопла двигателя. На рисунке 2 приведена зависимость давления паров воды в выхлопной струе ракетного двигателя и давления насыщающих паров воды от температуры, а на рис. 3 зависимость температуры продуктов сгорания от времени.

Очевидно, что вклад различных механизмов в процессы нагрева и охлаждения конденсирующихся частиц не одинаков.

Оценим эффективность охлаждения конденсирующихся частиц в результате теплообмена с окружающим газом по сравнению с нагревом из-за выделения энергии при конденсации. Отношение выделяемой энергии к энергии, теряемой на теплоотдачу — a_T , составляет:

$$a_T = \left\{ 4\pi r^2 \alpha Q \frac{P_v - P_s}{\sqrt{T_v}} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi k}} \right\} / \left\{ 4\pi r^2 \varepsilon (T_p - T_v) \frac{P}{P_0} \right\}.$$

Полагая, что $P_s \ll P_v$, $T_v \sim 100$ К, а $T_p \sim 273$ К ($T_p \cong 273$ К максимальная температура, при которой возможна конденсация), нетрудно найти: $a_T \sim 20\alpha (P_v/P)$. Если коэффициент адаптации $\alpha \sim 0.9$ [Wu, 1975], а парциальное давление паров воды в выхлопной струе ракетного двигателя $>10\%$ от давления продуктов сгорания, механизм отвода тепла от конденсирующихся частиц посредством теплоотдачи неэффективен. В продуктах сгорания жидкостных ракетных двигателей парциальное давление паров воды в зависимости от используемого топлива составляет от $\sim 30\%$ (несимметричный диметилгидразин) до $\sim 97\%$ (водородно-кислородное топливо). Самое низкое содержание паров воды в продуктах сгорания твердотопливных двигателей $\sim 8\%$ [Экологические..., 2000]. Таким образом, в отсутствие других механизмов потери энергии отвод энергии конденсации в результате теплообмена с продуктами сгорания необходимо учитывать в основном в выхлопной струе твердотопливных ракетных двигателей. Для жидкостных ракетных двигателей отсутствие альтернативных механизмов отвода выделяющейся энергии приведет к уменьшению эффективного значения коэффициента адаптации до значений $\sim 0.05 \div 0.1$, вследствие чего существенно уменьшится скорость конденсации. Очевидно также, что для жидкостных ракетных двигателей предположение о тепловом равновесии конденсата и продуктов сгорания необоснованно.

Более эффективным является механизм потери энергии в результате теплового излучения конденсата. Сравним энергию конденсации с потерями на излучения:

$$\left\{ 4\pi r^2 \alpha Q \frac{P_v - P_s}{\sqrt{T_v}} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi k}} \right\} \div \left\{ 4\pi r^2 \gamma \sigma T_p^4 \right\}.$$

Принимая, как и выше, характерное значение $T_v \approx 100$ К получим, что радиационные потери энергии обеспечивают эффективное охлаждение конденсата при условии $\eta P_v < T_p/300$ (P — Па, T — К, $\eta \approx 1$ — размерный коэффициент). Нетрудно убедиться, что это условие может выполняться во всех областях выхлопной струи, находящихся за точкой начала конденсации.

Покажем теперь, что на этапе конденсации нагрев частиц солнечным излучением и тепловым излучением сопла двигателя имеет второстепенное

значение по сравнению с нагревом в результате выделения скрытой теплоты конденсации.

Для малых частиц коэффициент поглощения излучения описывается выражением [Ван де Хюлст, 1961]

$$\chi(r, \lambda) = \text{Re} \left[i8\pi r (m^2 - 1) / \lambda (m^2 + 2) \right],$$

где $m = n - ik$ — комплексный показатель преломления. В расчетах использовалась зависимость n и k от λ , полученная в работе [Bohren and Huffman, 1982]. Для вычисления количества энергии солнечного излучения, поглощаемой частицей, использовалась зависимость $F_S(\lambda)$, полученная интерполяцией данных, приведенных в публикации [Аллен, 1977]. Излучение сопла двигателя представлялось излучением черного тела площадью ~ 1 м² (с очевидностью это завышенная величина) с температурой 4000 К. Интегрирование по λ проводилось по области длин волн 0.3–10 мкм, для которой определены значения коэффициента поглощения.

Отношения энергии, выделяемой при конденсации, к энергии солнечного излучения и теплового излучения сопла двигателя, поглощаемой частицей конденсата, составляют соответственно:

$$a_S = \left\{ 4\pi r^2 \alpha Q \frac{P_v - P_s}{\sqrt{T_v}} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi k}} \right\} / \pi r^2 \times \int \chi(r, \lambda) F_S(\lambda) d\lambda \approx \pi r^2 90r$$

$$a_N = \left\{ 4\pi r^2 \alpha Q \frac{P_v - P_s}{\sqrt{T_v}} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi k}} \right\} / \pi r^2 \times \int \chi(r, \lambda) B(T_N, \lambda) d\lambda \approx \pi r^2 75 \left(\frac{l_c}{l} \right)^2 r.$$

Полагая, как и выше, $P_s \ll P_v$, $T_v \sim 100$ К, $\alpha \approx 1$, получим: $a_S \approx 25 P/r$ и $a_N \approx 30 P/r$ (P в Па, r в мкм). Очевидно, что для частиц с характерным размером 0.01–0.1 мкм в области наиболее интенсивной конденсации a_S и a_N существенно больше единицы, и нагрев частиц излучением второстепенен. Следует, однако, заметить, что после окончания конденсации, нагрев частиц солнечным излучением становится определяющим в тепловом балансе частиц. Несложные оценки показывают, что интенсивность теплового излучения факела (продуктов сгорания) даже в предположении, что они излучают как черное тело, не превышает 10% от интенсивности излучения сопла, поэтому этим механизмом нагрева также можно пренебречь в тепловом балансе частиц.

Проведенные оценки позволяют заключить, что наиболее значимыми механизмами в тепловом балансе конденсирующихся частиц являются их нагрев в результате выделения скрытой энергии конденсации и охлаждение из-за собственного теплового из-

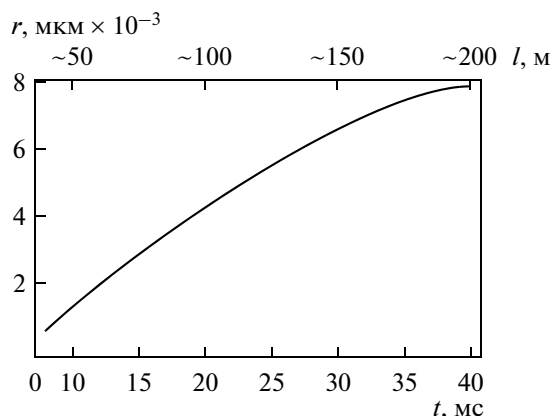


Рис. 4. Изменение толщины конденсирующегося слоя от времени (расстояния от сопла двигателя).

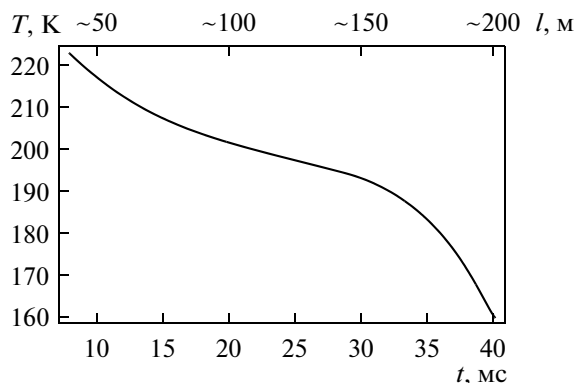


Рис. 5. Изменение температуры конденсирующейся частицы от времени (расстояния от сопла двигателя).

лучения. Уравнения теплового баланса и изменения массы частиц в этом приближении имеют вид:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3}{r(t)\rho q(T_p)} \times \left\{ \frac{\alpha Q_{con} [P_v(t) - P_s(T_p)]}{\sqrt{T_v}} \sqrt{\frac{\mu}{2k\pi}} - \beta \sigma T^4 \right\}. \quad (3)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\alpha [P_v(t) - P_s(T_p)]}{\sqrt{T_v}} \sqrt{\frac{\mu}{2k\pi}}. \quad (4)$$

Результаты численного решения этих уравнений для начальных условий $T(t=8 \text{ мс}) = 220 \text{ К}$, $r(t=8 \text{ мс}) = 10 \text{ \AA}$ приведено на рис. 4 и рис. 5. В вычислениях значения $q(T)$ и $P_s(T)$ интерполировались по данным [Физические..., 1991].

Поскольку процесс конденсации имеет поверхностный характер, скорость изменения толщины слоя конденсации, естественно, практически не должна зависеть от начального размера ядер конденсации, что и подтверждается вычислениями при различных начальных условиях.

Расчеты, проведенные с различными начальными значениями температуры T_p частиц, показали, что вне зависимости от начальных значений T_p в достаточно широком диапазоне (180÷250 К) температура частиц практически сразу принимает равновесное значение, определяемое балансом между нагревом и охлаждением ($\approx 220 \text{ К}$). Достаточно медленное уменьшение температуры частиц со временем по сравнению с температурой продуктов сгорания говорит о том, что конденсат не находится в тепловом равновесии с газовой фазой.

Таким образом, активный процесс конденсации в выхлопной струе жидкостного водород-кислородного ракетного двигателя в условиях верхней атмосферы происходит на расстояниях $\sim 50\div 200 \text{ м}$ от сопла двигателя. Толщина конденсированного слоя

не зависит от начального размера ядер конденсации и определяется, в основном, величиной давления паров воды в продуктах сгорания и составляет $\sim 80 \text{ \AA}$ для принятой зависимости давления и температуры в выхлопной струе.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе не рассматривается вопрос о механизме образования ядер конденсации, их количестве и структуре факела ракетного двигателя. Эти вопросы требуют отдельного, специального исследования и выходят за рамки поставленной задачи. Целью работы является разработка модели процесса конденсации с учетом различных механизмов теплообмена конденсата с окружающей средой.

При постановке задачи был принят ряд допущений, ограничивающих область применения результатов, поэтому необходимо оценить корректность выбранного приближения.

В вычислениях неявно предполагалось, что частицы, образовавшиеся при конденсации продуктов сгорания, имеют сферическую форму, хотя, вероятнее всего, это не так, поскольку ядра конденсации могут иметь произвольную форму. Однако, поскольку толщина слоя конденсата может быть существенно больше начального размера частиц, это предположение можно считать оправданным. В расчетах также полагалось, что температура одинакова по всему объему частицы, хотя поверхностные слои должны быть более холодными. Вероятно, учет теплопроводности во внутренних областях частиц позволит уточнить изменение их температуры во времени, но не изменит результатов о скорости конденсации. Действительно, скорость конденсации определяется температурой паров воды в продуктах сгорания, а от температуры частицы зависит давление насыщающих паров над ее поверхностью. Так как при конденсации давление насыщающих паров существенно меньше давления конденсиру-

щегося пара, принятое допущение представляется справедливым.

По этой же причине можно не учитывать увеличение давления насыщающих паров над кривой поверхностью, т.е. поверхностью конденсата. Соотношение давлений насыщающих паров над выпуклой P_{rS} и плоской P_S поверхностью определяется выражением [Ландау и Лифшиц, 1976]: $\ln(P_{rS}/P_S) \approx 0.15/rT$, где (T — измеряется в К, а r — мкм). Вычисления показали, что учет этого эффекта не меняет полученных результатов.

В приближении, принятом в работе [Wu, 1975], т.е. когда конденсирующиеся частицы находятся в тепловом равновесии с продуктами сгорания, процесс их роста описывается только уравнением (4), в котором температура частицы равна температуре про-

$$дуктов сгорания \quad T_v = T_p : \delta r \approx \int_{t_0}^t \frac{\alpha [P_v(\tau) - P_S(T_v)]}{\rho} \times \sqrt{\mu/2\pi k T_v(\tau)} d\tau.$$

Изменение толщины слоя конденсации от времени для этого случая показано на рис. 6.

Оцененный таким образом максимальный размер частиц конденсации отличается от величины, полученной в работе [Wu, 1975] почти в 20 раз (~300 Å и ~17 Å). Это различие связано с тем, что в гомогенной среде (продукты сгорания состоят практически из одних только паров воды) при тепловом равновесии между парами и конденсатом эффективный коэффициент адаптации молекул воды к поверхности частиц уменьшается примерно на эту же величину. Использованный автором подход может быть справедлив, вероятно, в случае, когда парциальное давление паров воды в продуктах сгорания незначительно, и тепловое равновесие частиц воды с газовой фазой устанавливается в результате теплообмена с другими компонентами продуктов сгорания.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение уравнений теплового баланса и баланса массы частиц, конденсирующихся из паров воды в выхлопной струе ракетного двигателя в условиях верхней атмосферы, позволяет определить динамику изменения их размеров и температуры. Образующийся конденсат не находится в тепловом равновесии с газообразными продуктами сгорания, а доминирующим процессом в отводе энергии конденсации от частиц является их тепловое излучение.

Для других двигателей область конденсации паров воды в выхлопной струе и характерные размеры частиц могут существенно отличаться от полученных значений. Действительно, давление на срезе сопла для различных двигателей ракет носителей, работающих в верхних слоях атмосферы, отличается в несколько раз — от ~5 КПа (последняя ступень

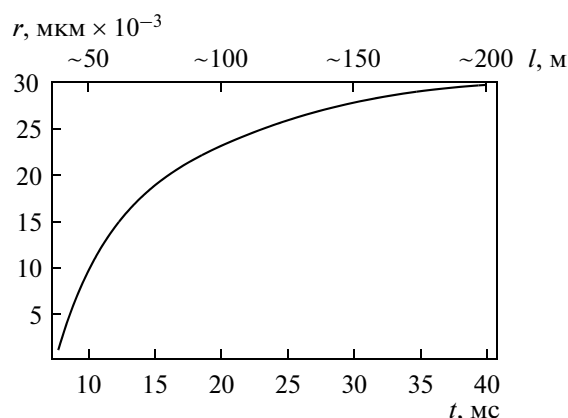


Рис. 6. Изменение толщины слоя конденсации от времени для случая теплового равновесия конденсата с продуктами сгорания.

ракета-носитель “Союз”) до ~19 КПа (ракета-носитель “Протон”) [Экологические проблемы..., 2000]. В широком диапазоне значений меняется также количество продуктов сгорания, выбрасываемых из двигателя в единицу времени. В зависимости от состава топлива меняется парциальное давление паров воды в продуктах сгорания, что естественно, должно приводить к изменению параметров конденсирующихся частиц. Очевидно, что для каждого конкретного случая необходимы расчеты с учетом конкретных физических условий в продуктах сгорания двигательных установок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-05-007920.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир. 1977.
- Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. М.: Мир. 1961.
- Ветчинкин Н.В., Границкий Л.В., Платов Ю.В., Шейхет А.И. Оптические явления в околоземной среде при работе двигательных установок ракет и спутников. I. Наземные и спутниковые наблюдения искусственных образований при запусках ракет // Космич. исслед. № 1. С. 93–100. 1993.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука. 1976.
- Платов Ю.В., Куликова Г.Н., Черноус С.А. Классификация газопылевых образований в верхней атмосфере, связанных с выбросами продуктов сгорания ракетных двигателей // Космич. исслед. Т. 41. № 2. С. 168–173. 2003.
- Платов Ю.В., Семенов А.И., Филиппов Б.П. Сублимация твердой уголекислоты в условиях верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 3. С. 416–422. 2005.

- Физические величины. Справочник. Ред. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. М.: Энергоатомиздат. 1232 с. 1991.
- Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Справочное пособие. отв. ред. Адушкин В.В., Козлов С.И. и Петров А.В. М.: Анкил. 639 с. 2000.
- *Boeyer, J.M.* Water Vapor Condensation as an Explanation for the Great Apparent Radiance of Sun-Lit High Altitude Rocket Exhaust Plume // *Progress in Astronautics and Aeronautics: Heterogeneous Combustion*. V. 15. Ed. H.G. Wolfgan, I. Glassman, L. Green, Jr. New York: Academic Press. P. 725–738. 1964.
- *Bohren C.F., Huffman D.R.* Absorption and scattering of light by small particles. J. New York: Wiley Sons. 541. p. 1983.
- *Kung R.T.V., Cianciolo L., Myer J.A.* Solar Scattering from Condensation in Apollo Translunar Injection Plume // *AIAA Journal* V. 13. № 4. P. 432–437. 1975.
- *Platov Y.V., Kosch M.J.* Sublimation of ice particles from rocket exhausts in the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 108. N. A12. P. 1434–1439. 2003.
- *Platov Y.V., Chernouss S.A., M.J. Kosch M.J.* Classification of Gas-Dust Formations from Rocket Exhaust in the Upper Atmosphere // *Journal of Spacecraft and Rockets*. V. 41. № 4. P. 667–670. 2004.
- *Simmons F.S.* Rocket Exhaust Plume Phenomenology. California: Aerospace Press 2350 El Segundo. 286 p. 2000.
- *Wu B.J.C.* Possible Water Vapor Condensation in Rocket Exhaust Plume // *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. V. 13. № 6. P. 797–802. 1975.