

УДК 532.546; 533.15

ПЛЕНОЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ В КАПЛЕУЛОВИТЕЛЕ В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО КОСМОСА¹

А. А. Коротеев, А. Н. Осипцов, Е. С. Попущина

Московский авиационный институт

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Рассматривается неизотермическое пленочное течение, формирующееся на внутренней поверхности конического каплеуловителя, на вход которого подается однородный поток монодисперсной капельной среды в условиях открытого космоса. Для режима инерционного осаждения капель в предположении малости относительной толщины пленки и влияния вторичных капель, образующихся при осаждении на поверхность пленки, построены и исследованы асимптотические модели стационарного пленочного течения. Для медленного изотермического течения форма поверхности и параметры пленки найдены аналитически. Для общего случая проведено параметрическое численное исследование распределений скорости, температуры и толщины пленки. Найдены параметры течения во входном сечении отводящего канала и определены условия, необходимые для поддержания стационарного режима работы каплеуловителя.

Ключевые слова: капли, каплеуловитель, пленка, инерционное осаждение, стационарное течение

1 Введение

В рамках модифицированной модели [1] рассматривается течение на входе в коническую воронку каплеуловителя (Рис. 1(а)), предназначенного для работы в условиях открытого космоса. Модификация модели [1] в рассматриваемом случае связана с отсутствием несущей газовой фазы в набегающем потоке, что изменяет граничные условия и порядки величин некоторых параметров по сравнению с рассмотренным в [1] случаем обтекания поверхности газокапельным потоком.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-00502)

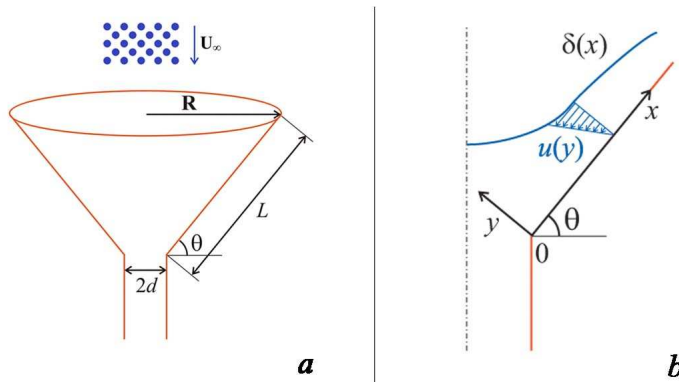


Рис. 1. Схема каплеуловителя (а) и система координат (b)

Каплеуловитель является элементом перспективной системы охлаждения орбитальных комплексов, он предназначен для сбора капель жидкого хладагента (вакуумного масла), который служит рабочим веществом системы охлаждения аппарата. Хладагент диспергируется с помощью специальных устройств, позволяющих создать регулярное направленное движение монодисперсных капель с характерным размером порядка ста микрон. Стационарное движение капельного потока в открытом космосе организуется на ограниченном участке таким образом, чтобы обеспечить заданную теплоотдачу капель за счет излучения. Каплеуловитель обязан обеспечить сбор диспергированного хладагента за счет инерции направленного движения капель в отсутствие силы тяжести.

Целью работы является исследование осредненного течения в пленке хладагента, формирующейся на внутренней поверхности каплеуловителя, и анализ условий, необходимых для поддержания стационарного режима работы каплеприемника при непрерывной подаче капель хладагента.

2 Постановка задачи

Система координат связана с внутренней поверхностью воронки (Рис. 1(b)). Координата x^* (с началом в угловой точке) направлена по образующей внутренней поверхности воронки, координата y^* направлена по нормали к поверхности воронки, r^* — расстояние от рассматриваемой точки до оси симметрии (звездочками здесь и далее, где это необходимо, отмечены размерные переменные).

Считается, что капли идентичные по физическим свойствам сферы радиуса σ и массы m . Скорость потока капель на входе в каплеуловитель постоянна и равна V_∞ , хаотическое движение капель отсутствует, числовая концентрация капель n_∞ постоянна и задана. Предполагается, что на внутренней поверхности воронки каплеуловителя формируется движущаяся

яся жидкая пленка толщиной $\delta^*(x^*)$. Течение пленки считается ламинарным и описывается уравнениями несжимаемой вязкой жидкости с переменной (зависящей от температуры) вязкостью, теплопроводность вещества пленки считается постоянной.

Рассматривается предельный случай, когда потоки массы и импульса осаждающихся капель полностью передаются жидкой пленке. Это предположение соответствует пренебрежению вторичными каплями, которые могут образовываться при столкновении осаждающихся капель с поверхностью пленки.

На неизвестной внешней границе пленки должны быть выполнены условия непрерывности потоков массы, импульса и энергии.

Введем безразмерные и растянутые переменные в пленке следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x^*}{L}, & \xi &= \frac{y^*}{L\sqrt{\varepsilon}}, & u_f &= \frac{u_f^*}{U}, & v_f &= \frac{v_f^*}{U\sqrt{\varepsilon}}, & p_f &= \frac{p_f^*}{\rho_s^* V_\infty^2}, \\ T_f^* &= \frac{T_f^* - T_w^*}{T_\infty^* - T_w^*}, & \mu_f &= \frac{\mu_f^*}{\mu_{fw}^*}, & \varepsilon &= \frac{\mu_{fw}^*}{\rho_f^* V_\infty L} = \frac{1}{\text{Re}_f}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь L — длина образующей конической воронки; U — характерная продольная скорость течения в пленке; индексами w и ∞ отмечены параметры на стенке и в набегающем капельном потоке, масштабы для обезразмеривания выбраны из соображений непротиворечивости и из граничных условий на внешней границе пленки; Re_f — число Рейнольдса, посчитанное по параметрам пленки и скорости набегающего капельного потока; μ_f^* считается известной функцией температуры, вид которой будет приведен ниже. Для рассматриваемых условий обтекания каплеприемника ($L \sim 50$ см, $V_\infty \sim 100 - 500$ см/сек, $\mu_{fw}^* \sim 0.1 - 1$ г/см·сек, $\rho^* \sim 1$ г/см³) $\text{Re}_f \sim 10^3 - 10^5 \gg 1$, соответственно $\varepsilon \ll 1$.

При $\varepsilon \rightarrow 0$ возникают две предельные постановки задачи о течении в пленке, различающиеся порядком величины характерной продольной скорости U . Из условия баланса массы в пленке, считая $\delta_0^* \sim L\sqrt{\varepsilon}$ и $v_s^* \sim V_\infty$, получаем, что масштаб U есть $V_\infty \sqrt{\text{Re}_f \tau_{s\infty}}$. Обозначим $\tau_{s\infty} \sqrt{\text{Re}_f} = k$, тогда асимптотические уравнения пленки при $\varepsilon \rightarrow 0$ будут зависеть от величины параметра k . Для типичных условий работы каплеприемника могут иметь место случаи $k \sim O(1)$ и $k \ll O(1)$.

Подставив (1) в уравнения Навье-Стокса, записанные в выбранной криволинейной системе координат, и оставив главные члены по ε , получаем

уравнения пленки (в безразмерном виде):

$$\begin{aligned} \frac{\partial[u_f(d+x\cos\theta)]}{\partial x} + \frac{\partial[v_f(d+x\cos\theta)]}{\partial \xi} &= 0, \\ k \left(u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial u_f}{\partial \xi} \right) &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mu_f \frac{\partial u_f}{\partial \xi} \right), \\ k \left(u_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial T_f}{\partial \xi} \right) &= \frac{1}{\text{Pr}} \frac{\partial^2 T_f}{\partial \xi^2} + \text{Ec} \mu_f k^2 \left(\frac{\partial u_f}{\partial \xi} \right)^2, \\ \text{Pr} &= \frac{c_f^* \mu_{fw}^*}{\lambda_f^*}, \quad \text{Ec} = \frac{U_\infty^2}{c_f^* (T_\infty^* - T_w^*)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $d = d^*/L$ — безразмерный радиус горловины воронки. При выводе уравнений (2) считалось, что числа Прандтля Pr и Эккерта Ec имеют порядок единицы. В уравнении импульса отброшен член с продольным градиентом давления, поскольку он имеет порядок $\rho_s^*/\rho_f^* = \tau_{s\infty}$, что в рассматриваемых условиях является заведомо малой величиной.

На стенке ($\xi = 0$) заданы граничные условия прилипания: $u_f = v_f = 0$ и фиксированная температура T_{fw}^* , что в безразмерном виде соответствует $T_f = 0$. На внешней границе пленки при $\xi = \delta(x)$ ($\delta(x)$ — неизвестная форма поверхности пленки) из условий непрерывности потоков массы, импульса и энергии имеем:

$$\begin{aligned} v_f - u_f \frac{d\delta}{dx} &= -\cos\theta, \\ \mu_f \frac{\partial u_f}{\partial \xi} + \cos\theta(ku_f + \sin\theta) &= 0, \\ -k \cos\theta \left(\frac{1 - k^2 u_f^2}{2} + \frac{1 - T_f}{\text{Ec}} \right) + k^2 \mu_f u_f \frac{\partial u_f}{\partial \xi} + \frac{1}{\text{Pr Ec}} \frac{\partial T_f}{\partial \xi} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Требуется еще задание граничного условия при $x = 1$. В случае, если пленка формируется лишь за счет осаждающихся капель, это условие имеет вид: $\delta(1) = 0$, $u_f = 0$, $v_f = 0$, $T_f = 0$. В случае же, когда пленка формируется за счет тангенциального подвода хладагента, это условие можно задать в виде:

$$x = 1, \quad \delta = \delta_0, \quad v_f = 0, \quad u_f = -C\xi, \quad T_f = 0. \quad (4)$$

Здесь C — заданная положительная константа.

В случае $k \ll 1$ («медленное» течение) система (2)–(4) сводится к уравнениям теории смазки и может быть решена аналитически, при этом решение для толщины пленки имеет вид:

$$\delta^2(x) = \delta_0^2 \frac{d + \cos\theta}{d + x \cos\theta} + \frac{(d + \cos\theta)^2}{(d + x \cos\theta) \sin\theta \cos\theta} - \frac{d + x \cos\theta}{\sin\theta \cos\theta}.$$

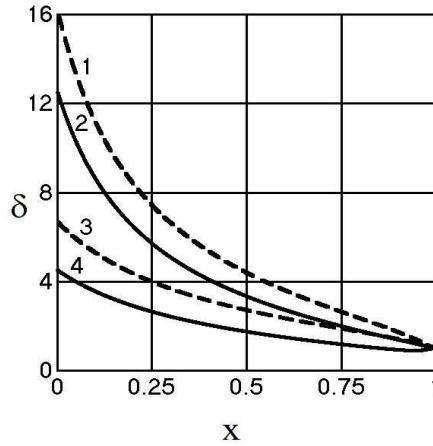


Рис. 2. Толщина пленки при $\theta = \pi/6$ (кривые 1, 2) и $\theta = \pi/3$ (кривые 3, 4) с постоянной (кривые 1, 3) и переменной вязкостью (кривые 2, 4) ($k = 1, d = 0.2, \delta_0 = 1$)

При $k \sim 1$ задача решалась численно с использованием неявной конечно-разностной схемы [2]. В численных расчетах принята следующая зависимость вязкости жидкости от температуры:

$$\mu/\mu_{fw} = (T_f/T_{fw})^{-2.303}.$$

Здесь T_f и T_{fw} — температура жидкости в пленке и температура стенки в градусах Цельсия. Выбраны следующие значения безразмерных параметров: число Прандтля $Pr = 1720$, число Эккерта $Ec = 0.0004$ (температура падающих капель $T_\infty = 70^\circ\text{C}$, температура стенки $T_w = 30^\circ\text{C}$).

Результаты типичных расчетов толщины пленки при различных углах раствора воронки приведены на Рис. 2. На Рис. 3(a–b) приведены характерные профили продольной и поперечной скорости жидкости в пленке.

3 Анализ условий стационарного режима работы каплеуловителя

Был проведен анализ условий реализации расчетного стационарного режима работы каплеуловителя, в котором вся масса собранного хладагента засасывается в горловину воронки, занимая все пространство отводного канала. Из условий баланса массы и импульса для всего входного устройства каплеприемника при $k \ll 1$ получено следующее приближенное выражение для давления жидкости в горле воронки:

$$\langle p_{f0}^* \rangle = \rho_s^* V_\infty^2 \frac{S_0}{S_1} \left[1 - \left(1 - \frac{S_1}{S_0} \right) \cos \theta \right].$$

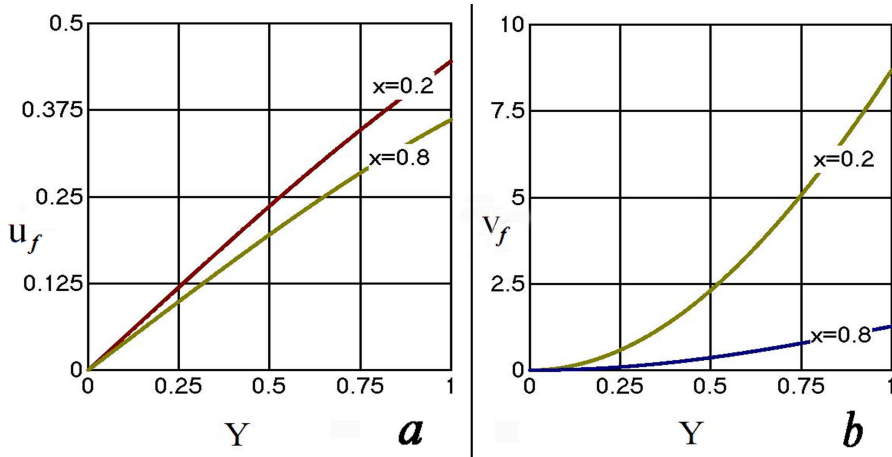


Рис. 3. Профиль продольной (а) и поперечной (б) скорости в пленке при постоянной вязкости, $k = 1$, $d = 0.2$, $\delta_0 = 1$, $\theta = \pi/6$ в двух сечениях $x = 0.2$ и $x = 0.8$ ($Y = \xi/\delta(x)$)

Здесь $S = \pi(d^* + L \cos \theta)^2$ — размерная площадь проекции воронки на направление движения капель; $S_1 = \pi d^{*2}$ — размерная площадь сечения горловины воронки.

4 Заключение

Построена асимптотическая модель пленочного течения на внутренней поверхности каплеуловителя. Определен параметр подобия k , в зависимости от значений которого движение жидкости в пленке описывается либо уравнениями теории смазки, либо уравнениями пограничного слоя, которые следует решать в слое заранее неизвестной толщины, на внешней границе которого заданы распределенные потоки массы, импульса и энергии.

При малых k найдено аналитическое решение для параметров пленки. При конечных k толщина пленки, профили скорости и температуры определены из параметрических численных расчетов.

Из интегральных условий баланса массы и импульса определены условия, необходимые для стационарной работы каплеуловителя, при которых поступающая в каплеуловитель жидкость полностью занимает отводной канал.

Список литературы

- [1] Осипцов А. Н., Шапиро Е. Г. Обтекание поверхности аэродисперсным потоком с образованием жидкой пленки из осаждающихся частиц // Изв. АН СССР, МЖГ. 1989. № 4. С. 85–92.
- [2] Самарский А. А. Теория разностных схем // М.: Наука, 1983. 616 с.