

УДК 532.529

## ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В СИСТЕМЕ КАПЕЛЬНАЯ ПЕЛЕНА – КАПЛЕУЛОВИТЕЛЬ В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО КОСМОСА

© 2011 г.

Е.С. Попущина

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

popushina@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

При проектировании системы охлаждения космических аппаратов возникает необходимость в разработке специальных устройств для теплоотвода в условиях открытого космоса. В качестве принципиально нового элемента космической энергетической установки предполагается использовать капельный холодильник-излучатель, основными узлами которого являются генератор капельной пелены и каплеуловитель. С помощью генератора осуществляется формирование упорядоченной пелены мелкодисперсных капель горячего теплоносителя. Стационарное движение капельного потока организуется на ограниченном участке в открытом космосе таким образом, чтобы обеспечить заданную теплоотдачу капель за счет излучения. Остывший теплоноситель собирается в каплеуловителе и возвращается в рабочий контур космической энергетической установки. Рассмотрен процесс охлаждения потока монодисперсных капель вакуумного масла в условиях открытого космоса. В условиях применимости к капельной пелене модели оптически толстого слоя выведено уравнение притока тепла. Построены профили температуры потока капель на различных расстояниях от генератора капель. Предложен способ сбора капель с помощью каплеуловителя, состоящего из воронки и отводящего канала, на внутренней поверхности которого за счет инерционного осаждения капель хладагента формируется пленка. Построена асимптотическая модель пленочного течения вакуумного масла в каплеуловителе. Упрощенные уравнения Навье – Стокса решаются в тонком слое заранее неизвестной толщины, на внешней границе которого заданы распределенные потоки массы, импульса и энергии, соответствующие параметрам осаждающихся на пленку капель. Форма поверхности пленки, а также профили скорости и температуры определены из параметрических численных расчетов. Проведено исследование трехмерных эффектов, вызванных отклонением потока капель хладагента от направления, параллельного оси каплеуловителя.

*Ключевые слова:* капли, открытый космос, каплеуловитель, пленочное течение.

### Задача об осредненном описании радиационного теплообмена в движущейся капельной пелене

В двухмерной постановке рассмотрена теплоотдача капельной пелены, толщина  $D$  которой превосходит длину свободного пробега излучения  $l_R = (\sigma a^2 n_s)^{-1}$ , где  $\sigma$  – постоянная Стеффана Больцмана,  $a$  – радиус капли, числовая концентрация капель  $n_s$  постоянна, характерная длина в направлении движения капельной пелены  $l \gg l_R$ . Безразмерные переменные введены следующим образом:

$$x = \frac{x^*}{l}, \quad y = \frac{y^*}{l_R}, \quad T = \frac{T^*}{T_0}.$$

Здесь  $T_0$  – температура капель, вылетающих из генератора. В приближении лучистой теплопроводности (вектор потока тепла  $\mathbf{q}_R = -4l_R \sigma \nabla T^{*4} / 3$ )

уравнение притока тепла при  $l \gg D$  имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{4}{3} \alpha \frac{\partial}{\partial y} \left( T^3 \frac{\partial T}{\partial y} \right);$$

$$x = 0 : T = 1; \quad y = 0 : T = \gamma \frac{\partial T}{\partial y}; \quad y = \delta / 2 : \frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

$$\alpha = \frac{3\sigma T_0^3 l}{ac_s \rho V_\infty}, \quad \gamma = \frac{16}{3\chi}, \quad \delta = \frac{D}{l_R}.$$

Здесь  $c_s$  – теплоемкость вещества капель,  $V_\infty$  – скорость капель,  $\rho$  – плотность вещества капель,  $\chi$  – степень черноты. Полученная система решалась численно для типичных условий работы системы охлаждения. Показано, что средняя температура в сечении капельной пелены существенно выше температуры одиночной капли. Для эффективного охлаждения всего слоя капель его толщина не должна превышать нескольких длин свободного пробега излучения.

**Течение в каплеуловителе с учетом отклонения потока капель от оси конической воронки**

Для непрерывной работы всей установки необходимо, чтобы каплеуловитель обеспечивал сбор диспергированного хладагента лишь за счет инерции направленного движения капель в отсутствие силы тяжести. На рис. 1а представлена схема каплеуловителя, который состоит из конической воронки (длина образующей  $L$ , угол между образующей конуса и плоскостью перпендикулярной оси симметрии  $\theta$ ) и отводящего канала радиусом  $d$ .

Для описания течения в пленке вводится неподвижная коническая система координат (рис. 1б), положение точки в которой определяется тройкой  $x$  (расстояние от нижнего края воронки до проекции точки на поверхность каплеуловителя),  $y$  (расстояние до поверхности каплеуловителя) и  $\varphi$  (угол между начальным и текущим направлением в плоскости, перпендикулярной к оси каплеуловителя). Считается, что капли – идентичные по физическим свойствам сферы, хаотическое движение капель отсутствует, объемная концентрация капель  $\tau_\infty$  постоянна и задана. Предполагается, что на внутренней поверхности воронки каплеуловителя формируется движущаяся жидкая пленка толщиной  $\delta(x, \varphi)$ . Течение пленки считается ламинарным и описывается уравнениями несжимаемой вязкой жидкости с переменной (зависящей от температуры) вязкостью  $\mu$ , теплопроводность вещества пленки постоянна. Рассматривается предельный случай, когда потоки массы и импульса осаждающихся капель полностью передаются жидкой пленке. При этом пренебрегается вторичными каплями, которые могут образовываться при столкновении осаждающихся капель с поверхностью пленки. Кроме того, игнорируются процессы испарения и теплообмена за счет излучения на внешней границе пленки. На неизвестной внешней границе пленки выполнены условия непрерывности потоков массы, импульса и энергии. Угол отклонения потока капель равен  $\gamma$ .

Для рассматриваемых условий обтекания каплеуловителя в пренебрежении членами порядка  $\epsilon = 1/Re_f = \mu_w / (\rho V_\infty L)$  уравнения Навье – Стокса сводятся к уравнениям типа пограничного слоя. При выводе уравнений считалось, что числа Прандтля  $Pr$  и Эккерта  $Ec$  имеют порядок единицы. Параметр  $k = Re_f^{1/2} \tau_\infty$  определяет характерную скорость течения в пленке, так как из условия баланса массы в пленке с учетом того, что толщина пленки  $\delta \sim L\epsilon^{1/2}$ , скорость течения в пленке имеет порядок  $V_\infty k$ . Для типичных условий работы каплеуловителя могут иметь место случаи  $k \sim O(1)$  и  $k \ll O(1)$ .

При  $k = 0$  течение в пленке изотермическое. Форма поверхности задается уравнением в частных производных, которое методом характеристик может быть сведено к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$u_s v_s r (\delta^2)'_x + w_s v_s (\delta^2)'_\varphi = 2rv_s - \delta^2 \left( \frac{\partial(w_s v_s)}{\partial\varphi} + u_s v_s \cos\theta \right)$$

Здесь  $u_s, v_s, w_s$  – известные функции, задающие компоненты вектора скорости капель на входе в каплеуловитель. При  $k \sim O(1)$  решение задачи находилось численно с помощью неявной конечно-разностной схемы, имеющей первый порядок аппроксимации по продольной координате и второй порядок по поперечной координате. Сначала находилось решение в плоскости растекания ( $\varphi = 0^\circ$ ), от которой расчет проводился до плоскости стекания ( $\varphi = 180^\circ$ ). Было проведено параметрическое исследование профилей скорости и температуры. На рис. 1в показана зависимость толщины пленки от угла  $\varphi$  при значениях параметров:  $Pr = 1720, Ec = 0.0004$  (температура капель  $T_\infty^* = 343$  К, температура стенки  $T_w^* = 303$  К), параметр  $k = 0.5$ , безразмерный радиус горловины воронки  $d = 0.2$ , угол наклона образующей конуса  $\theta = 60^\circ$ , начальная толщина пленки  $\delta_0 = 1$ ; угол отклонения потока капель  $\gamma = 10^\circ$  и  $\gamma = 0^\circ$ ). Кривые 1 и 2 на рисунке соответствуют  $k = 0.5$ , 3 и 4 –  $k = 0.1$ ; 1 и 3 –  $\gamma = 10^\circ$ , 2 и 4 –  $\gamma = 0^\circ$ . Видно, что

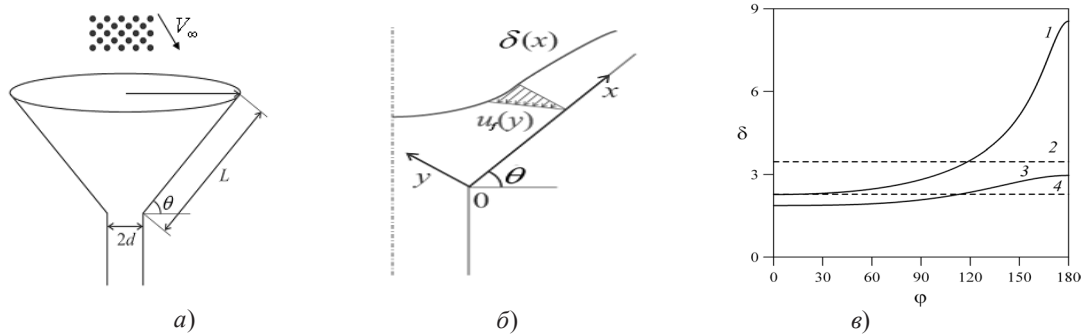


Рис. 1

в плоскости стекания толщина пленки существенно возрастает. На основе параметрических расчетов определены границы оптимальных режимов

работы каплеуловителя.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №11-01-00483а.*

## HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN A DROPLET SHEET DROPLET CATCHER SYSTEM IN OPEN SPACE CONDITIONS

*E.S. Popushina*

Designing a novel cooling system for spacecraft calls for special devices for heat removal in the open space. As a fundamentally novel element of the space power plant, it is proposed to use a drop cooler-generator, the basic units of which are a generator of a droplet sheet and a drop catcher. The drop generator creates a directed motion of a monodisperse medium of fine drops of the hot liquid coolant. A steady motion of the drops of a vacuum oil is organized in the open space, so that the drops lose a fixed amount of heat due to radiation. The cooled droplets are collected in the drop catcher and the oil is returned to the working duct of the space power plant. The process of cooling a moving sheet of monodisperse oil droplets is considered in the open space conditions. Using the model of an optically thick layer, the heat influx equation for the droplet sheet is derived. Temperature fields of droplets at different distances from the drop generator are calculated. The method of collecting the drops using a drop catcher consisting of a funnel and an outlet channel is proposed. It is assumed that a moving liquid film is formed on the inner surface of the drop catcher due to the inertia of the droplets depositing on the film. An asymptotic model of an oil film flow in the drop catcher is constructed. Simplified Navier–Stokes equations are solved in a thin film of unknown thickness, at the outer boundary of which the balance conditions for the mass, momentum, and energy fluxes are specified. A parametric numerical study of the profiles of velocity, temperature, and film thickness is performed. Three-dimensional effects caused by the deviation of the drop stream from the drop catcher axis are examined.

*Keywords:* drop, open space, drop catcher, film flow.