

## Аналитические методы расчета радиационного охлаждения капельных потоков в условиях микрогравитации и глубокого вакуума

**Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев**

*Рассмотрены аналитические методы расчета радиационного охлаждения пелены капельных холодильников-излучателей в условиях микрогравитации, глубокого вакуума и наличия внешнего излучения.*

Целью настоящего исследования является создание и реализация аналитического метода расчета радиационного охлаждения пелены капельного холодильника-излучателя (КХИ). В отличие от традиционных трубчато-ребристых излучателей и излучателей, выполненных на основе пакета тепловых труб, капельные излучатели имеют существенно меньшие массовые показатели и состоят из генератора и гидросборника капельного потока (рис. 1).

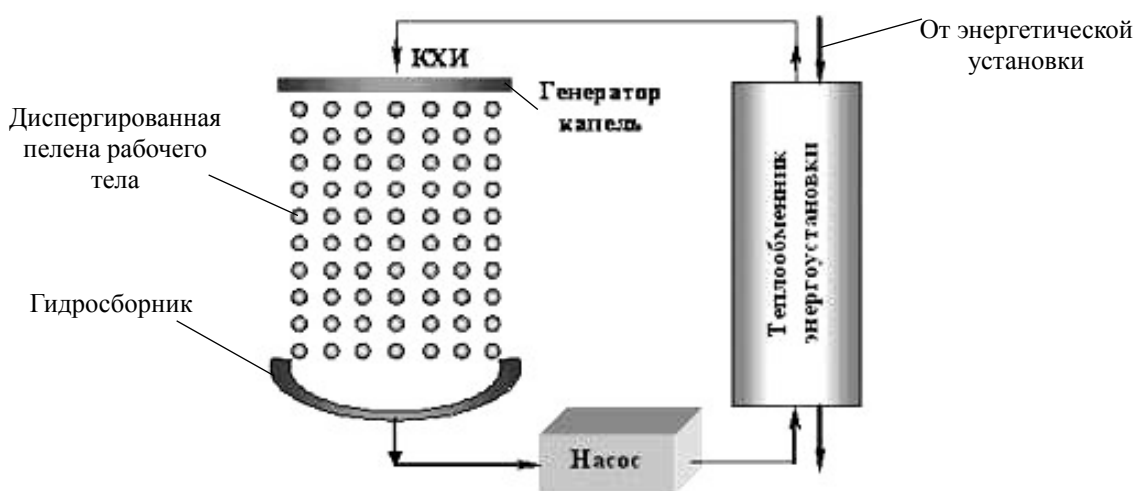


Рис. 1. Капельный холодильник-излучатель

С помощью генератора осуществляется формирование капельных струек горячего теплоносителя, который охлаждается на пути к гидросборнику и, собираясь в нем, направляется снова в рабочий контур. Наличие вакуума и отсутствие гравитационных сил позволяют использовать значительное количество специальным образом сформированных капельных струек теплоносителя, распространяющихся по заданным траекториям. Преимуществами таких излучателей являются: минимальное тепловое сопротивление между теплоносителем и излучающей поверхностью; неуязвимость к метеорному пробою и малая масса, не превышающая в соответствии с проведенными оценками (0,15-0,2) кг/кВт. В результате, масса теплообменника космического аппарата существенно уменьшается, а масса полезной нагрузки увеличивается в несколько раз.

Рассматривается схема диспергированной капельной пелены, внешняя поверхность которой имеет форму прямоугольного параллелепипеда (рис. 2).

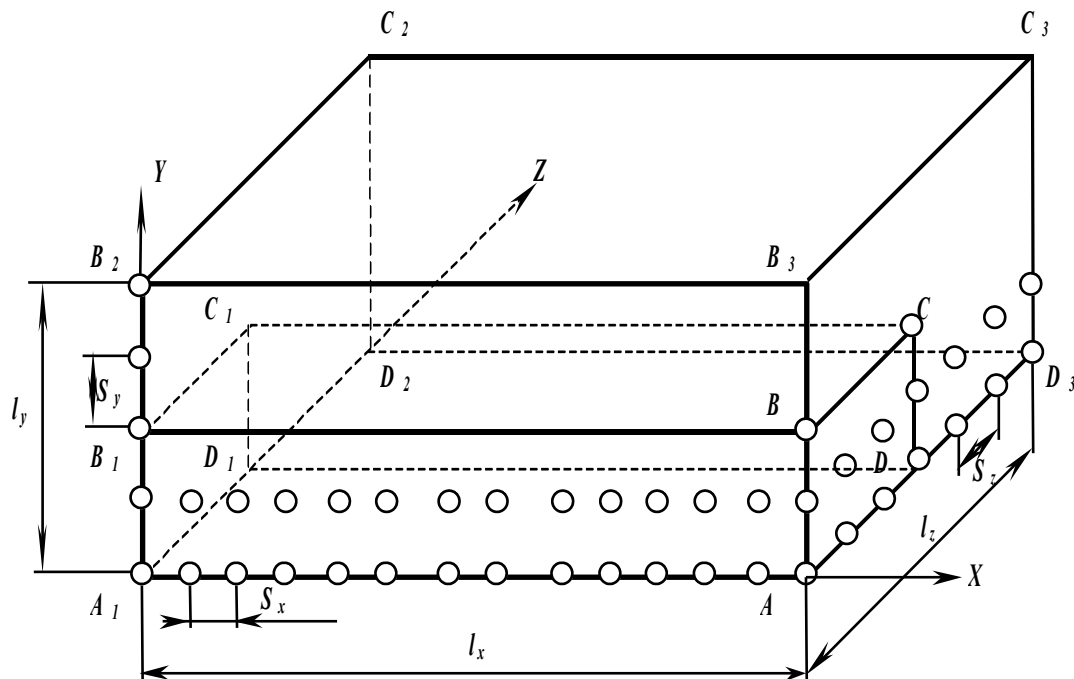


Рис. 2. Расчетная схема диспергированной пелены капельного излучателя.

Считается, что пелена состоит из равномерно расположенных и движущихся в направлении оси  $X$  с постоянной скоростью  $u$  монодисперсных сферических капель с радиусом  $r_k$ . Расстояния между центрами капель в направлениях координатных осей  $X, Y, Z$  равны соответственно  $s_x, s_y, s_z$ ; полные размеры пелены в направлениях этих осей составляют соответственно  $l_x, l_y, l_z$ .

Схему генерации капельного потока упрощенно можно представить следующим образом (рис. 3).

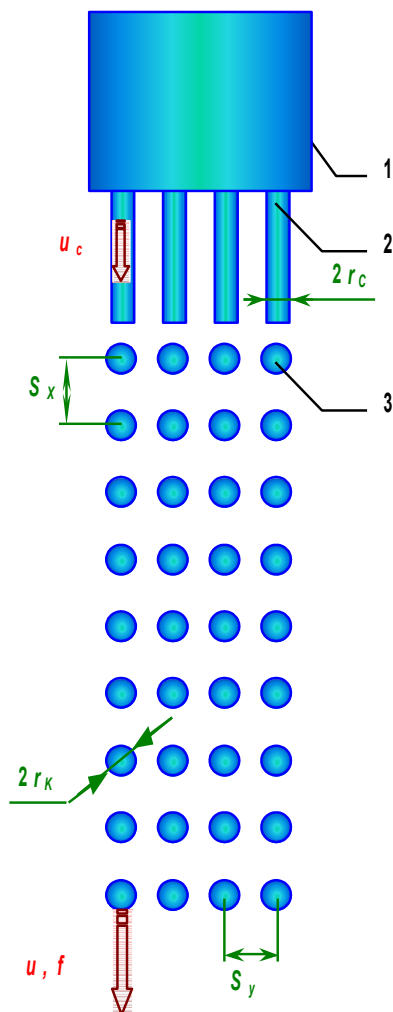


Рис. 3. Упрощенная схема генерации плоского капельного потока (1 – генератор капель; 2 – нераспавшиеся на капли струйки рабочего тела в окрестности выхода из генератора; 3 – капли диспергированной пелены рабочего тела).

Горячий теплоноситель поступает в генератор капельного потока 1, на выходе из которого установлена фильера с сформированными в определенной последовательности капиллярными отверстиями. На рисунке изображена схема плоского капельного потока, образованного фильерой с однорядной системой отверстий. В общем случае, в окрестности выходного сечения генератора формируются нераспавшиеся на капли струйки теплоносителя с радиусом  $r_c$ , движущиеся со скоростью  $u_c$ . Под действием возмущений, характеризующихся частотой  $f$ , происходит вынужденный капиллярный распад струек на капли, движущиеся со скоростью  $u$ . Источником каплеобразующих возмущений могут являться, например, колебания пьезоэлемента, установленного внутри генератора капель и соединенного с генератором звуковой частоты.

Приведенная на рис. 2 схема каплеобразования носит качественный приближенный характер. В действительности, форма нераспавшейся на капли части струи отличается от цилиндрической, т.к. распаду предшествует ее трансформация, сопровождающаяся образованием «перетяжек». Строго говоря, радиус нераспавшейся части струи является переменной величиной. В дальнейшем используется его осредненное значение, равное радиусу капиллярного отверстия фильеры генератора.

При отсутствии внешних возмущений, происходит процесс естественного каплеобразования, закономерности которого впервые изучил Релей. При естественном каплеобразовании выполняются следующие соотношения:

$$(1) \quad r_k = 1,89r_c; \quad s_x = 9r_c .$$

В капельных холодильниках-излучателях естественное каплеобразование не используется из-за практических трудностей получения прогнозируемого размера капель и обеспечения их монодисперсности.

Масса рабочего тела  $M_c$ , переносимая за время  $t$ , в пределах нераспавшейся на капли струйки составляет:

$$(2) \quad M_c = \pi r_c^2 u_c t \rho ,$$

где  $\rho$  – плотность рабочего тела.

Масса рабочего тела  $M_k$ , переносимая за это же время каплями, равна:

$$(3) \quad M_k = n m_k ,$$

где  $n$  – число капель, пролетающих контрольное сечение за промежуток времени  $t$ ;  $m_k$  – масса одной капли.

Так как

$$(4) \quad m_k = \frac{4}{3} \pi r_k^3 \rho ,$$

$$(5) \quad n = \frac{ut}{s_x} = ft ,$$

выражение для  $M_k$  принимает вид:

$$M_{\kappa} = \frac{4}{3} \pi r_{\kappa}^3 \rho \frac{ut}{s_x}. \quad (6)$$

В стационарном случае  $M_c = M_{\kappa}$ , поэтому

$$u_c r_c^2 = \frac{4}{3} \frac{u r_{\kappa}^3}{s_x} = \frac{4}{3} f r_{\kappa}^3. \quad (7)$$

Из последнего выражения следует зависимость радиуса капель, образующихся при вынужденном капиллярном распаде от среднего радиуса нераспавшейся части струйки (приблизительно равного радиусу капиллярного отверстия фильеры генератора капель), скорости движения нераспавшейся части и частоты каплеобразующих колебаний:

$$r_{\kappa} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{u_c r_c^2}{f}}. \quad (8)$$

Изменение температуры капли при ее свободном распространении в вакууме на пути длиной  $l_x$  при условии отсутствия внешнего облучения определяется выражением [1]:

$$\frac{1}{T_{l_x}^3} - \frac{1}{T_0^3} = \frac{9 \varepsilon_{\kappa} \sigma}{\rho c} l_x \frac{1}{r_{\kappa} u}, \quad (9)$$

где  $T_{l_x}$ ,  $T_0$  – соответственно температура капли после прохождения расстояния  $l_x$  и в начальный момент времени,  $\varepsilon_{\kappa}$  – интегральная степень черноты капли,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Если расстояние между центрами капель в направлении оси  $x$  выразить через радиус капель, т.е.

$$s_x = A_x r_{\kappa}, \quad (10)$$

выражение (5) можно переписать в виде

$$\frac{u}{r_{\kappa}} = A_x f. \quad (11)$$

Выражения (9-11) образуют систему трех уравнений с тремя неизвестными ( $u_c$ ,  $u$ ,  $r_k$ ). Решение этой системы позволяет в первом приближении (без учета взаимного переоблучения капель) оценить параметры капельного потока рабочего тела, реализуемые при осуществлении заданной схемы генерации (безразмерное расстояние между центрами капель в направлении распространения потока  $A_x = \frac{s_x}{r_k}$ , частота каплеобразования  $f$ ), тепловую мощность  $N_{mc}$ , отводимую от одной струйки излучателя, требуемое количество струек для обеспечения сброса заданной условия функционирования конкретной энергетической установки тепловой мощности  $N_m$ , а также поперечные размеры капельной пелены. Действительно, если ввести обозначения

$$B = \frac{9\varepsilon_k \sigma l_x}{\rho c \left( \frac{1}{T_{l_x}^3} - \frac{1}{T_0^3} \right)}, \quad (12)$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{3 r_0^2}{4 f}}, \quad (13)$$

из совместного рассмотрения (9-11) следует, что

$$u = \sqrt{A_x B f}, \quad (14)$$

$$r_k = \sqrt{\frac{B}{A_x f}}, \quad (15)$$

$$u_c = \frac{r_k^3}{C^3}. \quad (16)$$

Выражение для определения  $N_{mc}$  имеет вид:

$$N_{mc} = \frac{4}{3} \pi r_k^3 \rho \frac{u}{s_x} c (T_0 - T_{l_x}). \quad (17)$$

Полное требуемое количество струек излучателя  $Z$  равно

$$Z = \frac{N_m}{N_{mc}} . \quad (18)$$

Если предположить, что расстояния между отверстиями фильеры генератора капельного потока равны, т.е.  $s_y=s_z$ , а поперечное сечение капельной пелены имеет квадратную форму, общее количество струек излучателя в направлении координатных осей  $y, z$  (соответственно  $Z_y, Z_z$ ) составит

$$Z_y = Z_z = \sqrt{Z} . \quad (19)$$

Перед расчетами  $Z_y, Z_z$  величина  $Z$  должна быть округлена до ближайшего целого числа, не меньшего  $Z$ , являющегося квадратом целого числа.

В общем случае пелена капельного излучателя может распространяться в условиях внешнего излучения (как правило, солнечного). Влияние внешнего излучения может быть учтено с помощью разработанной аналитической методики расчета остывания капель.

Если  $q_{c0}$  - плотность теплового потока солнечного излучения на орбите космического аппарата (часто орбитой космического аппарата можно приближенно считать орбиту Земли, тогда  $q_{c0} = 1,4 \text{ кВт} / \text{м}^2$ ), а  $T_{pc}$  - равновесная температура, которую имеет излучающая капля, находящаяся под воздействием теплового потока  $q_{c0}$ , то при  $a_k \approx \varepsilon_k$

$$T_{pc} = \sqrt[4]{\frac{q_{c0}}{4\sigma}} . \quad (20)$$

Обыкновенное дифференциальное уравнение охлаждения капельных струй в условиях внешнего облучения имеет вид:

$$\frac{dT}{(T_{pc}^4 - T^4)} = \frac{3\varepsilon_k \sigma_l}{r_k \rho u c_p} dx . \quad (21)$$

Результатом его интегрирования является трансцендентное уравнение, позволяющее определить температуру капель:

$$\ln \frac{\bar{T} + 1}{\bar{T} - 1} + 2 \operatorname{arctg} \bar{T} + \ln \frac{\bar{T}_0 - 1}{\bar{T}_0 + 1} - 2 \operatorname{arctg} \bar{T}_0 = 4 I_{pc} \bar{x},$$

(22)

где  $\bar{T} = \frac{T}{T_{pc}}$ ,  $\bar{T}_0 = \frac{T_0}{T_{pc}}$ ,  $\bar{x} = \frac{x}{l_x}$ ,  $I_{pc} = \frac{3 \varepsilon_{\kappa} \sigma T_{pc}^3 l_x}{r_{\kappa} \rho u c_p}$  – параметры капельного излучателя, рассчитанные по равновесной температуре  $T_{pc}$ .

Разложение функций последнего уравнения в степенные ряды приводит к алгебраическому уравнению степени  $4n-1$  ( $n$  – число учитываемых при решении членов разложения).

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{4n-1} \left( \frac{1}{\bar{T}^{4n-1}} - \frac{1}{\bar{T}_0^{4n-1}} \right) \right] = I_{pc} \bar{x}.$$

(23)

Для  $n = 2$ , распределение температуры капель на облучаемой плоскости определяется из решения уравнения 7-ой степени вида

$$\frac{1}{3} \left( \frac{1}{\bar{T}^3} - \frac{1}{\bar{T}_0^3} \right) + \frac{1}{7} \left( \frac{1}{\bar{T}^7} - \frac{1}{\bar{T}_0^7} \right) \approx I_{pc} \bar{x}.$$

(24)

Перед проведением расчетов влияния внешнего излучения на температурные характеристики капель полезно провести сравнение значений возведенных в четвертую степень равновесной температуры  $T_{pc}$  и ожидаемой температуры  $T_c$  капельного потока в окрестности гидросборника. Влияние солнечного излучения на распределение температуры в струе целесообразно

учитывать при  $\frac{T_{pc}^4}{T_c^4} \geq 0,025 \div 0,05$ , т.е. при анализе характеристик рабочего процесса средне- и, особенно, низкотемпературных излучателей. Температурные поля высокотемпературных излучателей практически не зависят от внешнего энергоподвода.

На рис. 4. представлен график изменения температуры капель вдоль струек, находящихся на освещенной Солнцем стороне.



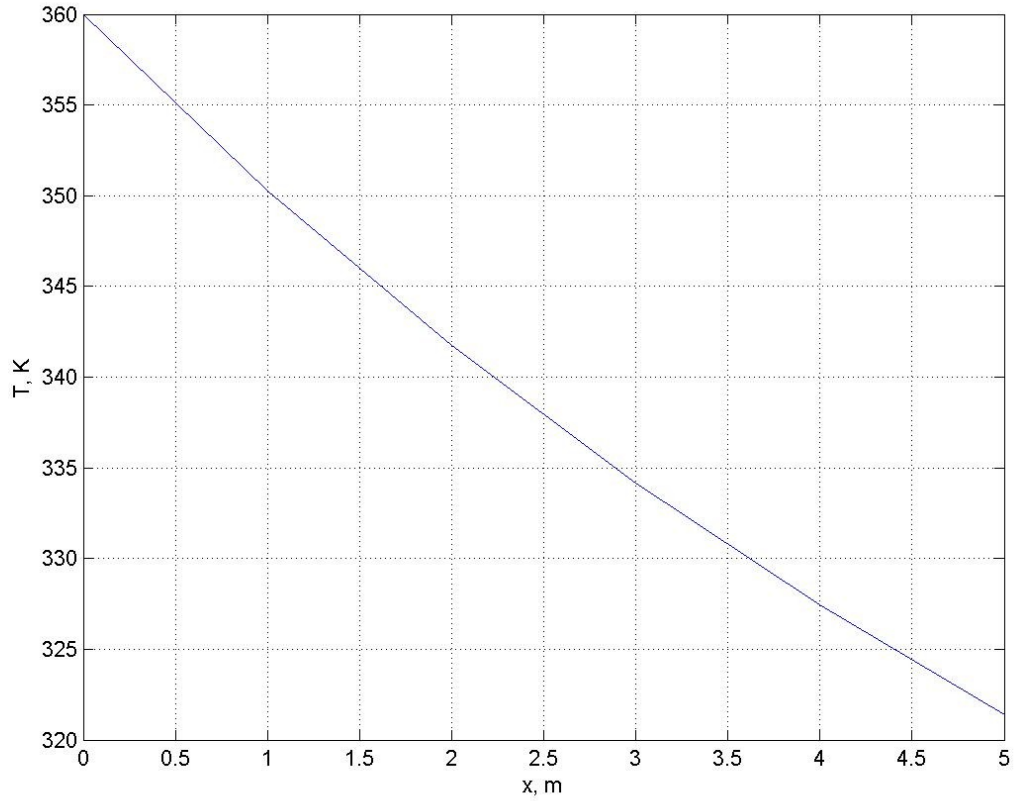


Рис.4. Изменение температуры капель вдоль струек находящихся на освещенной Солнцем стороне.

Проведение более точных расчетов характеристик капельной пелены требует учета взаимного переоблучения капель в потоке излучателя, которое рассматривается в дальнейших публикациях.

### **Список литературы**

1. Паневин И.Г. Высокотемпературные теплообменные аппараты ЭСУ ЛА. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 1990.

---

### **Сведения об авторах**

Конюхов Георгий Владимирович, главный специалист Федерального государственного унитарного предприятия Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, д.т.н., проф.

Коротеев Анатолий Анатольевич, директор центра Космические технологии Московского авиационного института (государственного технического университета), д.т.н., проф., член-корреспондент РАН.

**ANALYTIC METHODS OF DROP FLOW RADIATIVE COOLING CALCULATIONS  
IN THE CONDITIONS OF MICRO GRAVITY AND DEEP VACUUM**

**G.V. Konioukhov, A.A. Koroteev**

*Analytic methods of calculation of liquid droplet radiator's shroud radiative cooling in the conditions of micro gravitation, deep vacuum and external radiation are considered.*