

ТЕПЛОБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев

Представлен метод расчета радиационного охлаждения пелены капельного холодильника-излучателя. Рассмотрены возможности упрощенной реализации метода в случае оптической прозрачности капельного потока в одном из направлений.

В работе [1] охарактеризованы капельные холодильники-излучатели – новые устройства, предназначенные для отвода низкопотенциального тепла в перспективных космических энергетических установках (КЭУ), отличающихся высокой удельной мощностью (более 5 кВт/кг), метеорной неуязвимостью и длительными сроками активного существования. В простейшем случае капельный холодильник-излучатель (КХИ) состоит из генератора и гидросборника капельного потока. С помощью генератора в открытом космическом пространстве осуществляется формирование пелены мелкодисперсных капель горячего теплоносителя. На пути от генератора к гидросборнику происходит его охлаждение. Холодный теплоноситель собирается гидросборником и направляется далее в рабочий контур. Цикл является замкнутым, если испарение рабочего тела пренебрежимо мало.

Реализация достоинств капельных излучателей в наибольшей степени осуществима в условиях космического пространства. Сочетание вакуума и отсутствия гравитационных сил позволяет использовать большое количество специальным образом сформированных струек теплоносителя, обеспечивающих его эффективное охлаждение без каких-либо ограничений, накладываемых на взаимную ориентацию генератора и гидросборника.

Целью данной работы является создание метода расчета радиационного охлаждения пелены капельного холодильника-излучателя

Рассматривается расчетная схема диспергированной капельной пелены, внешняя поверхность которой имеет форму прямоугольного параллелепипеда (рис.1). 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 .

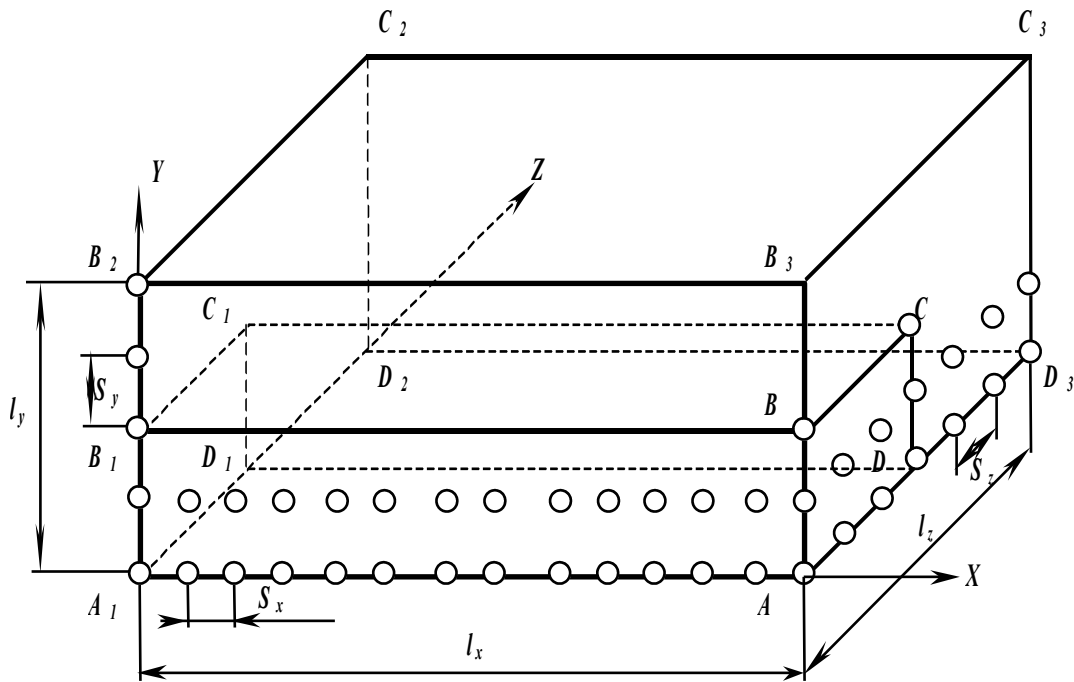


Рис.1. Расчетная схема диспергированной пелены капельного излучателя.

Проведение расчетов характеристик пелены требует учета взаимного переоблучения капель. В случае отсутствия внешнего излучения параллелепипед $A_1B_2C_2D_2AB_3C_3D_3$ (рис.1) представляет теплосимметричный элемент с элементарной расчетной ячейкой $A_1B_1C_1D_1ABCD$, также имеющей форму прямоугольного параллелепипеда. При этом $A_1B_1=D_1C_1=AB=CD=BB_3=B_1B_2$; $A_1D_1=B_1C_1=AD=BC=D_1D_2=DD_3$. Это следует из условий симметрии охлаждения капельной пелены при ее свободном распространении в космическом пространстве в условиях глубокого вакуума. Плоскости B_1C_1CB и D_1C_1CD являются адиабатными границами. Для удобства составления системы уравнений, позволяющей находить распределение температуры между отдельными каплями в пелене, желательно, чтобы Z_y, Z_z были нечетными числами. Тогда

$$l_y = s_y(Z_y - 1), \quad l_z = s_z(Z_z - 1) \quad , \quad (1)$$

линия C_1C совпадет с траекторией распространения центральной струйки излучателя, движущейся вдоль его оси симметрии, а плоскости B_1C_1BC и D_1C_1CD являются плоскостями распространения струек, характеризующихся максимумом температуры соответственно по направлениям y и z .

В пределах рассматриваемого элемента все капли нумеруются. Номер капли в направлении оси x обозначается i ; в направлении оси $y - j$; в направлении оси $z - k$. При принятой схеме нумерации капель в пределах расчетного параллелепипеда:

$$i=1, 2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x} + 1, j=1, 2, 3, \dots, \frac{l_y}{2s_y} + 1, k=1, 2, 3, \dots, \frac{l_z}{2s_z} + 1 . \quad (2)$$

Уравнение теплового баланса одиночной капли, движущейся со скоростью u в направлении оси x при отсутствии внешнего облучения, имеет вид

$$\frac{dT}{dx} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho u c} T^4 . \quad (3)$$

Пелена КХИ в общем случае представляет систему упорядоченно движущихся капель, поэтому в реальных условиях каждая капля находится под воздействием внешнего излучения от остывающих соседних. В работе [2] рассчитаны угловые коэффициенты φ взаимного облучения для двух сфер одинакового радиуса в зависимости от параметра

$$\xi = \frac{s}{r_k} - 2 , \quad (4)$$

где s - расстояние между центрами капель. Результаты численных расчетов φ при $0 \leq \xi \leq 10$ с погрешностью, не превышающей 2% аппроксимируются зависимостью:

$$\varphi(\xi) = 0,1 \exp(-1,31 \xi^{1/2}) . \quad (5)$$

Результаты расчетов углового коэффициента взаимного облучения по формуле (5) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Угловые коэффициенты взаимного облучения двух сфер одинакового радиуса в зависимости от параметра $\xi = s/r_k - 2$.

ξ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϕ	0,1	0,027	0,016	0,01	0,0072	0,0053	0,004	0,0031	0,0025	0,002	0,0016

Представленные данные свидетельствуют о быстром снижении значений ϕ с ростом расстояния между сферами. Поэтому при проведении расчетов радиационного охлаждения пелены капельного холодильника-излучателя достаточно учитывать влияние взаимного облучения только соседних (по каждому из пространственных направлений) капель. Более того, в большом количестве вариантов реально существующих геометрий взаимного расположения струек, требуется учитывать взаимное облучение между не всеми соседними каплями.

Для проведения дальнейших рассуждений вводятся угловые коэффициенты взаимного облучения ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z соответственно по направлениям x, y, z .

Дифференциальное уравнение для нахождения температуры $T_{i,j,k}$ капли с номером (i, j, k) , учитывающее наличие соседних излучающих капель в предположении отсутствия внешнего облучения, а также равенства интегральных коэффициентов излучения и поглощения, имеет вид:

$$-\frac{dT_{i,j,k}}{dx} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho_{ис}} \times \left\{ T_{i,j,k}^4 - \varepsilon \left[\varphi_x (T_{i-1,j,k}^4 + T_{i+1,j,k}^4) + \varphi_y (T_{i,j-1,k}^4 + T_{i,j+1,k}^4) + \varphi_z (T_{i,j,k-1}^4 + T_{i,j,k+1}^4) \right] \right\} \quad (6)$$

После замены в левой части (6) дифференциалов приращениями можно вместо дифференциального уравнения получить алгебраическое. Для капель, расположенных внутри параллелепипеда $A_1B_1C_1D_1ABCD$, оно записывается в виде:

$$-\frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho_{ис}} \times \left\{ T_{i,j,k}^4 - \varepsilon \left[\varphi_x (T_{i-1,j,k}^4 + T_{i+1,j,k}^4) + \varphi_y (T_{i,j-1,k}^4 + T_{i,j+1,k}^4) + \varphi_z (T_{i,j,k-1}^4 + T_{i,j,k+1}^4) \right] \right\} \quad (7)$$

$$i = 2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; j = 2, 3, \dots, \frac{l_y}{2s_y}; k = 2, 3, \dots, \frac{l_z}{2s_z} .$$

К уравнениям (7) добавляются уравнения радиационного охлаждения капель, центры которых располагаются на гранях и ребрах параллелепипеда $A_1B_1C_1D_1ABCD$.

Грани AA_1D_1D и AA_1B_1B . Капли, движущиеся в плоскостях этих граней, подвержены переоблучению только от трех соседних с ними капель. В направлении, перпендикулярном плоскостям граней, капли свободно излучают во внешнюю среду. Поэтому для грани AA_1D_1D :

$$\begin{aligned}
& -\frac{T_{i+1,j,1}-T_{i-1,j,1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k\rho_{ис}} \times \\
& \times \left\{ T_{i,j,1}^4 - \varepsilon[\varphi_x(T_{i-1,j,1}^4 + T_{i+1,j,1}^4) + \varphi_y(T_{i,j-1,1}^4 + T_{i,j+1,1}^4) + \varphi_z(T_{i,j,2}^4)] \right\} \\
& i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; j=2, 3, \dots, \frac{l_y}{2s_y} . \quad (8)
\end{aligned}$$

Для грани AA₁B₁B:

$$\begin{aligned}
& -\frac{T_{i+1,1,k}-T_{i-1,1,k}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k\rho_{ис}} \times \\
& \times \left\{ T_{i,1,k}^4 - \varepsilon[\varphi_x(T_{i-1,1,k}^4 + T_{i+1,1,k}^4) + \varphi_y(T_{i,2,k}^4) + \varphi_z(T_{i,1,k-1}^4 + T_{i,1,k+1}^4)] \right\} \\
& i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; k=2, 3, \dots, \frac{l_z}{2s_z} . \quad (9)
\end{aligned}$$

Грани DD₁C₁C и BB₁C₁C. Плоскости этих граней являются адиабатными границами течения

в направлении осей y и z соответственно. Температуры капель с номерами $(i, \frac{l_y}{2s_y}, k)$ и $(i, \frac{l_y}{2s_y} + 2,$

$k)$ равны. Поэтому влияние облучения капли $(i, \frac{l_y}{2s_y} + 2, k)$ на каплю $(i, \frac{l_y}{2s_y} + 1, k)$ может быть

учтено как удвоенное влияние капли $(i, \frac{l_y}{2s_y}, k)$. Уравнения для грани DD₁C₁C:

$$\begin{aligned}
& -\frac{T_{i+1, \frac{l_y}{2s_y}+1, k} - T_{i-1, \frac{l_y}{2s_y}+1, k}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k\rho_{ис}} \times \\
& \times \left\{ T_{i, \frac{l_y}{2s_y}+1, k}^4 - \varepsilon[\varphi_x \left(T_{i-1, \frac{l_y}{2s_y}+1, k}^4 + T_{i+1, \frac{l_y}{2s_y}+1, k}^4 \right) + \varphi_y \left(2T_{i, \frac{l_y}{2s_y}, k}^4 \right) + \varphi_z \left(T_{i, \frac{l_y}{2s_y}+1, k-1}^4 + T_{i, \frac{l_y}{2s_y}+1, k+1}^4 \right)] \right\}
\end{aligned}$$

$$i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; k=2, 3, \dots, \frac{l_z}{2s_z} . \quad (10)$$

Аналогично учитывается влияние облучения капли $(i, j, \frac{l_z}{2s_z} + 2)$ на каплю $(i, j, \frac{l_z}{2s_z} + 1)$.

Уравнения для грани ВВ₁С₁С:

$$\begin{aligned} & -\frac{T_{i+1,j,\frac{l_z}{2s_z}+1} - T_{i-1,j,\frac{l_z}{2s_z}+1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k\rho_{ис}} \times \\ & \times \left\{ T_{i,j,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 - \varepsilon[\varphi_x \left(T_{i-1,j,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 + T_{i+1,j,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 \right) + \varphi_y \left(T_{i,j-1,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 + T_{i,j+1,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 \right) + \varphi_z \left(T_{i,j,\frac{l_z}{2s_z}}^4 \right)] \right\} \\ & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; j=2, 3, \dots, \frac{l_y}{2s_y} . \quad (11) \end{aligned}$$

Для получения замкнутой системы уравнений необходимо рассмотреть процесс радиационного излучения капель, центры которых лежат на ребрах АА₁, ВВ₁, СС₁, DD₁ исследуемого параллелепипеда.

Ребро АА₁. Капли, центры которых расположены на этом ребре, испытывают переоблучение от двух соседних капель, расположенных на этом же ребре и от двух соседних капель по направлениям y и z . Уравнения для ребра имеют вид:

$$\begin{aligned} & -\frac{T_{i+1,1,1} - T_{i-1,1,1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k\rho_{ис}} \times \\ & \times \left\{ T_{i,1,1}^4 - \varepsilon[\varphi_x (T_{i-1,1,1}^4 + T_{i+1,1,1}^4) + \varphi_y (T_{i,2,1}^4) + \varphi_z (T_{i,1,2}^4)] \right\} \\ & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x} . \quad (12) \end{aligned}$$

Ребро DD₁. Расположенные на ребре капли испытывают переоблучение от двух соседних, расположенных на этом же ребре, двух капель по направлению z (их влияние учитывается в виде

удвоенного влияния одной капли ввиду того, что ребро принадлежит адиабатной границе потока) и одной соседней капли в направлении y . Соответствующие уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{T_{i+1,1,\frac{l_z}{2s_z}+1} - T_{i-1,1,\frac{l_z}{2s_z}+1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho_{лс}} \times \\
 & \times \left\{ T_{i,1,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 - \varepsilon[\varphi_x \left(T_{i-1,1,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 + T_{i+1,1,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 \right) + \varphi_y \left(T_{i,2,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 \right) + \varphi_z \left(2T_{i,2,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 \right)] \right\} \\
 & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x} . \quad (13)
 \end{aligned}$$

Ребро BB₁. Аналогичные рассуждения приводят к уравнениям:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{T_{i+1,\frac{l_y}{2s_y}+1,1} - T_{i-1,\frac{l_y}{2s_y}+1,1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho_{лс}} \times \\
 & \times \left\{ T_{i,\frac{l_y}{2s_y}+1,1}^4 - \varepsilon[\varphi_x \left(T_{i-1,\frac{l_y}{2s_y}+1,1}^4 + T_{i+1,\frac{l_y}{2s_y}+1,1}^4 \right) + \varphi_y \left(2T_{i,\frac{l_y}{2s_y},1}^4 \right) + \varphi_z \left(T_{i,\frac{l_y}{2s_y}+1,2}^4 \right)] \right\} \\
 & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x} . \quad (14)
 \end{aligned}$$

Ребро CC₁. Капли, центры которых расположены на этом ребре, испытывают переоблучение от соседних капель, расположенных на этом же ребре, двух соседних капель по направлению y и двух соседних капель по направлению z . Соответствующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{T_{i+1,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}+1} - T_{i-1,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}+1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho_{лс}} \times \\
 & \times \left\{ T_{i,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 - \varepsilon[\varphi_x \left(T_{i-1,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 + T_{i+1,j,k}^4 \right) + \varphi_y \left(2T_{i,\frac{l_y}{2s_y},\frac{l_z}{2s_z}+1}^4 \right) + \varphi_z \left(2T_{i,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}}^4 \right)] \right\}
 \end{aligned}$$

$$i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}. \quad (15)$$

Уравнения (7)-(15) образуют систему нелинейных алгебраических уравнений 4-ой степени.

Число уравнений системы равно:

$$\frac{l_x}{s_x} \frac{l_y}{2s_y} \frac{l_z}{2s_z} + \frac{l_x}{s_x} \frac{l_y}{2s_y} + \frac{l_x}{s_x} \frac{l_z}{2s_z} + \frac{l_x}{s_x} - \frac{l_y}{2s_y} \frac{l_z}{2s_z} - \frac{l_y}{2s_y} - \frac{l_z}{2s_z} - 1. \quad (16)$$

Количество капель, температура которых подлежит определению (центры капель расположены в объеме параллелепипеда $A_1B_1C_1D_1ABCD$ и на его гранях), составляет:

$$\frac{l_x}{s_x} \left(\frac{l_y}{2s_y} + 1 \right) \left(\frac{l_z}{2s_z} + 1 \right) = \frac{l_x}{s_x} \frac{l_y}{2s_y} \frac{l_z}{2s_z} + \frac{l_x}{s_x} \frac{l_y}{2s_y} + \frac{l_x}{s_x} \frac{l_z}{2s_z} + \frac{l_x}{s_x}. \quad (17)$$

Для замыкания системы (7)-(15) необходимо ввести дополнительные уравнения для нахождения температуры капель на грани $ABCD$, принадлежащей плоскости гидросборника. Эти уравнения могут являться реализацией на грани $ABCD$ «мягкого» граничного условия вида

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (ABCD) = 0, \quad (18)$$

т.е.

$$\frac{T l_x}{s_x} + 1, j, k = 2T \frac{l_x}{s_x}, j, k - T \frac{l_x}{s_x} - 1, j, k$$

$$j=1, 2, 3, \dots, \frac{l_y}{2s_y} + 1; k=2, 3, \dots, \frac{l_z}{2s_z} + 1. \quad (19)$$

Частные случаи радиационного охлаждения пелены КХИ. Квадратная «решетка» отверстий фильеры генератора капельного потока. Если фильера генератора имеет систему отверстий, центры которых расположены в вершинах квадрата, поток капель характеризуется равенством $s_y = s_z = s_{yz}$. Угловые коэффициенты взаимного облучения в направлениях y и z также равны:

$$\varphi_y = \varphi_z = \varphi_{yz} \quad . \quad (20)$$

Уравнения для расчета температуры капель имеют в этом случае следующий вид. Внутренний объем параллелепипеда:

$$\begin{aligned} & -\frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho_{uc}} \times \\ & \times \left\{ T_{i,j,k}^4 - \varepsilon[\varphi_x(T_{i-1,j,k}^4 + T_{i+1,j,k}^4) + \varphi_{yz}(T_{i,j-1,k}^4 + T_{i,j+1,k}^4 + T_{i,j,k-1}^4 + T_{i,j,k+1}^4)] \right\} \\ & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; j=2, 3, \dots, \frac{l_y}{2s_y}; k=2, 3, \dots, \frac{l_z}{2s_z} \quad . \quad (21) \end{aligned}$$

Грань AA₁D₁D:

$$\begin{aligned} & -\frac{T_{i+1,j,1} - T_{i-1,j,1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho_{uc}} \times \\ & \times \left\{ T_{i,j,1}^4 - \varepsilon[\varphi_x(T_{i-1,j,1}^4 + T_{i+1,j,1}^4) + \varphi_{yz}(T_{i,j-1,1}^4 + T_{i,j+1,1}^4 + T_{i,j,2}^4)] \right\} \\ & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; j=2, 3, \dots, \frac{l_y}{2s_y} \quad . \quad (22) \end{aligned}$$

Грань AA₁B₁B:

$$\begin{aligned} & -\frac{T_{i+1,1,k} - T_{i-1,1,k}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k \rho_{uc}} \times \\ & \times \left\{ T_{i,1,k}^4 - \varepsilon[\varphi_x(T_{i-1,1,k}^4 + T_{i+1,1,k}^4) + \varphi_{yz}(T_{i,2,k}^4 + T_{i,1,k-1}^4 + T_{i,1,k+1}^4)] \right\} \\ & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; k=2, 3, \dots, \frac{l_z}{2s_z} \quad . \quad (23) \end{aligned}$$

Грань DD₁C₁C:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{T_{i+1, \frac{l_y}{2s_y}+1, k} - T_{i-1, \frac{l_y}{2s_y}+1, k}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_K \rho_{uc}} \times \\
 & \times \left\{ T_{i, \frac{l_y}{2s_y}+1, k}^4 - \varepsilon[\varphi_x \left(T_{i-1, \frac{l_y}{2s_y}+1, k}^4 + T_{i+1, \frac{l_y}{2s_y}+1, k}^4 \right) + \varphi_{yz} \left(2T_{i, \frac{l_y}{2s_y}, k}^4 + T_{i, \frac{l_y}{2s_y}+1, k-1}^4 + T_{i, \frac{l_y}{2s_y}+1, k+1}^4 \right)] \right\} \\
 & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; k=2, 3, \dots, \frac{l_z}{2s_z}. \quad (24)
 \end{aligned}$$

Грань BB₁C₁C:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{T_{i+1, j, \frac{l_z}{2s_z}+1} - T_{i-1, j, \frac{l_z}{2s_z}+1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_K \rho_{uc}} \times \\
 & \times \left\{ T_{i, j, \frac{l_z}{2s_z}+1}^4 - \varepsilon[\varphi_x \left(T_{i-1, j, \frac{l_z}{2s_z}+1}^4 + T_{i+1, j, \frac{l_z}{2s_z}+1}^4 \right) + \varphi_{yz} \left(T_{i, j-1, \frac{l_z}{2s_z}+1}^4 + T_{i, j+1, \frac{l_z}{2s_z}+1}^4 + 2T_{i, j, \frac{l_z}{2s_z}}^4 \right)] \right\} \\
 & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; j=2, 3, \dots, \frac{l_y}{2s_y}. \quad (25)
 \end{aligned}$$

Ребро AA₁:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{T_{i+1, 1, 1} - T_{i-1, 1, 1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_K \rho_{uc}} \times \\
 & \times \left\{ T_{i, 1, 1}^4 - \varepsilon[\varphi_x (T_{i-1, 1, 1}^4 + T_{i+1, 1, 1}^4) + \varphi_{yz} (T_{i, 2, 1}^4 + T_{i, 1, 2}^4)] \right\} \\
 & i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Ребро DD₁:

$$-\frac{T_{i+1, 1, \frac{l_z}{2s_z}+1} - T_{i-1, 1, \frac{l_z}{2s_z}+1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_K \rho_{uc}} \times$$

$$\times \left\{ T^4_{i,1,\frac{l_z}{2s_z}+1} - \varepsilon[\varphi_x \left(T^4_{i-1,1,\frac{l_z}{2s_z}+1} + T^4_{i+1,1,\frac{l_z}{2s_z}+1} \right) + \varphi_{yz} \left(T^4_{i,2,\frac{l_z}{2s_z}+1} + 2T^4_{i,2,\frac{l_z}{2s_z}} \right)] \right\}$$

$$i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x} . \quad (27)$$

Ребро BB₁:

$$-\frac{T_{i+1,\frac{l_y}{2s_y}+1,1} - T_{i-1,\frac{l_y}{2s_y}+1,1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_K \rho_{UC}} \times$$

$$\times \left\{ T^4_{i,\frac{l_y}{2s_y}+1,1} - \varepsilon[\varphi_x \left(T^4_{i-1,\frac{l_y}{2s_y}+1,1} + T^4_{i+1,\frac{l_y}{2s_y}+1,1} \right) + \varphi_{yz} \left(2T^4_{i,\frac{l_y}{2s_y},1} + T^4_{i,\frac{l_y}{2s_y}+1,2} \right)] \right\}$$

$$i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x} . \quad (28)$$

Ребро CC₁:

$$-\frac{T_{i+1,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}+1} - T_{i-1,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}+1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_K \rho_{UC}} \times$$

$$\times \left\{ T^4_{i,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}+1} - \varepsilon[\varphi_x \left(T^4_{i-1,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}+1} + T^4_{i+1,j,k} \right) + 2\varphi_{yz} \left(T^4_{i,\frac{l_y}{2s_y},\frac{l_z}{2s_z}+1} + T^4_{i,\frac{l_y}{2s_y}+1,\frac{l_z}{2s_z}} \right)] \right\}$$

$$i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x} . \quad (29)$$

Грань ABCD:

$$\frac{T_{\frac{l_x}{s_x}+1,j,k}}{s_x} = 2\frac{T_{\frac{l_x}{s_x},j,k}}{s_x} - \frac{T_{\frac{l_x}{s_x}-1,j,k}}{s_x}$$

$$j=1,2,3,\dots,\frac{l_y}{2s_y}+1; k=2,3,\dots,\frac{l_z}{2s_z}+1 \quad (30)$$

Оптическая прозрачность потока в одном (нескольких) направлениях. Еще одним практически важным частным случаем радиационного охлаждения пелены КХИ является оптическая прозрачность потока в одном или нескольких направлениях. Если геометрия капельного потока такова, что расстояние между центрами капель в направлении течения много меньше соответствующего расстояния по одному или обоим поперечным направлениям, влиянием взаимного облучения соседних капель, расположенных поперек потока, можно пренебречь. Это приводит к очень существенному упрощению задачи расчета температурных полей. Однако, это упрощение не является искусственным. Геометрические характеристики пелены КХИ зачастую удовлетворяют требованиям оптической прозрачности хотя бы по одному из направлений.

Температурные характеристики пелены капельных холодильников-излучателей. Разработанный метод использован для расчета радиационного охлаждения монодисперсной капельной пелены излучателя высокотемпературной энергетической установки. Для обеспечения возможности сравнения результатов, полученных на основе использования двух разных моделей, применены те же исходные данные и форма представления, что и в работе [1], т.е. рассмотрена прямоугольная пелена жидкого олова ($\rho=6600$ кг/м³; $c=255$ Дж/(кгК)) при $T_0=1000$ К, $l_x=10$ м, $r_k=0,1$ мм, $u=5$ м/с, $\varepsilon_k=0,15$, $S_x=0,476$ мм, $S_z=2$ мм, $S_y=1,5S_z$. Число капель, ориентированных по оси Y , осталось неизменным и равнялось $Z_y=51$, размер пелены в направлении этой оси составлял $0,15$ м. Оптическая толщина варьировалась за счет изменения «глубины», т.е. числа Z_z капель, ориентированных по оси z . Такие геометрические параметры позволяют применить упрощенную схему реализации разработанного метода (рассмотрена ниже), однако для проведения полных сопоставлений условий и результатов реализации двух методов в данном случае упрощения не использовались.

На рис. 2 показано продольное распределение температур капель: T_m - в наименее охлаждаемой струйке излучателя (распространяется вдоль оси симметрии потока) и $T_{вн}$ - в наиболее эффективно охлаждаемых («внешних») струйках.

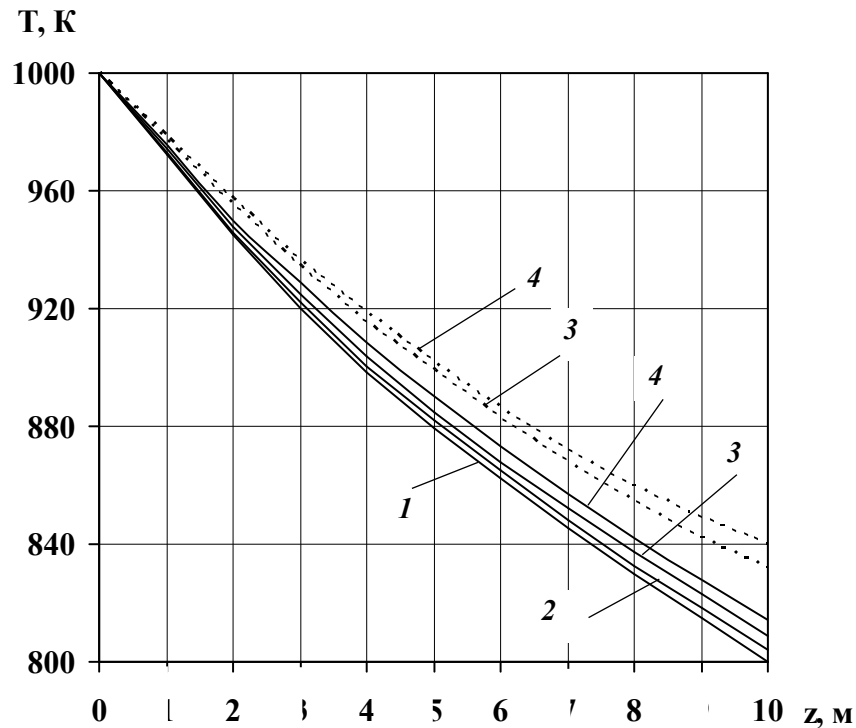
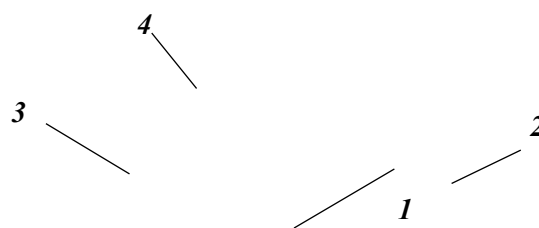


Рис. 2. Продольное распределение температур капель:
пунктир – T_m ; сплошная линия – $T_{вн}$ (1 – $Z_z=1$, $l_z=0$; 2 – $Z_z=9$, $l_z=0,016$ м; 3 – $Z_z=114$,
 $l_z=0,23$ м; 4 – $Z_z=455$, $l_z=0,91$ м). Расчет с использованием разработанного метода.

Изменение температуры по попутолщине струи ($0 \leq x \leq l_z/2$) при $x = l_x$, т.е в конечном сечении пелены, совпадающем с плоскостью гидросборника, иллюстрирует рис.3. Исследованы значения $Z_z=1$, $l_z=0$; $Z_z=9$, $l_z=0,016$ м; $Z_z=114$, $l_z=0,23$ м; $Z_z=455$, $l_z=0,91$ м.

В качестве примера использования упрощений разработанной модели рассмотрено радиационное охлаждение пелены вакуумного масла ($\rho=840$ кг/м³; $\varepsilon=0,8$; $c=1520$ Дж/(кгК)) капельного холодильника-излучателя космической энергетической установки, рабочий процесс которой организован по циклу Брайтона. Температура теплоносителя в генераторе капельного потока составляет $T_0=360$ К; ожидаемая температура в окрестности гидросборника $T_{l_x}=310$ К. Проектируемые параметры излучателя: тепловая мощность $N_m=81$ кВт; длина пролета капель $l_x=5$ м; радиус капель $r_k=0,2$ мм; скорость капель $u=0,63$ м/с; $s_x/r_k=3$. В случае квадратной упаковки центров отверстий фильер генератора с параметрами $s_y=s_z=5$ мм,

$$s_y/r_k=s_z/r_k=25 \quad (32)$$



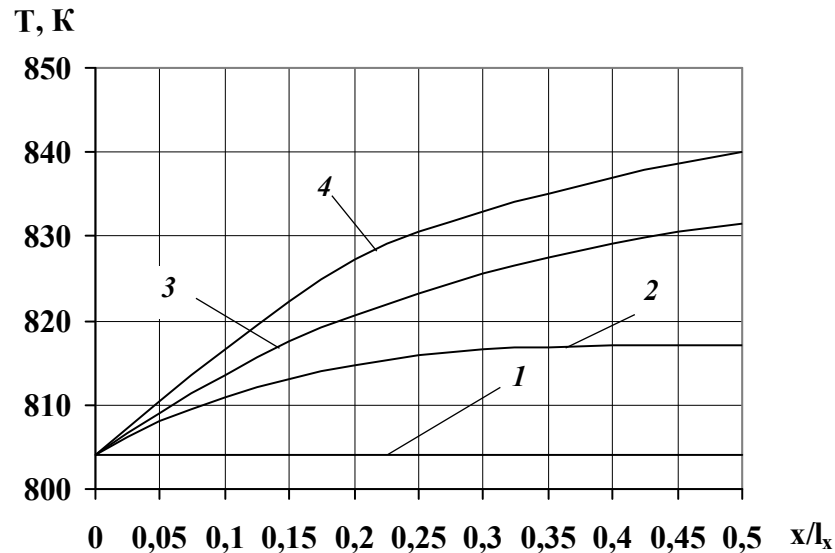


Рис.3. Изменение температуры по полутолщине капельной пелены при $z = l_z = 10$ м (1 – $Z_z=1$, $l_z=0$; 2 – $Z_z=9$, $l_z=0,016$ м; 3 – $Z_z=114$, $l_z=0,23$ м; 4 – $Z_z=455$, $l_z=0,91$ м). Расчет с использованием разработанного метода.

Угловые коэффициенты взаимного облучения капель в направлении x более, чем на порядок больше аналогичных коэффициентов по другим направлениям. Незначительное влияние «затенения» в направлениях, поперечных направлению движения капельного потока, обуславливает малый градиент температуры по этим же направлениям и возможность дальнейшего упрощения системы (21)-(30) путем сведения ее к одномерному виду:

$$-\frac{T_{i+1}-T_{i-1}}{2s_x} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r_k\rho_{ис}} \times \left\{ T_i^4 - \varepsilon\varphi_x(T_{i-1}^4 + T_{i+1}^4) \right\}, \quad i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}; \quad (33)$$

$$\frac{T_{\frac{l_x}{s_x}+1}}{s_x} = 2\frac{T_{\frac{l_x}{s_x}}}{s_x} - \frac{T_{\frac{l_x}{s_x}-1}}{s_x}, \quad (34)$$

где T_i – температура всех капель, центры которых располагаются в плоскости, перпендикулярной оси x и расположенной на расстоянии $(i-1)s_x/l_x$ от генератора капель, $i=2, 3, \dots, \frac{l_x}{s_x}, \frac{l_x}{s_x}+1$.

На рис. 4 представлен график изменения температуры капель при пролете рабочего участка излучателя.

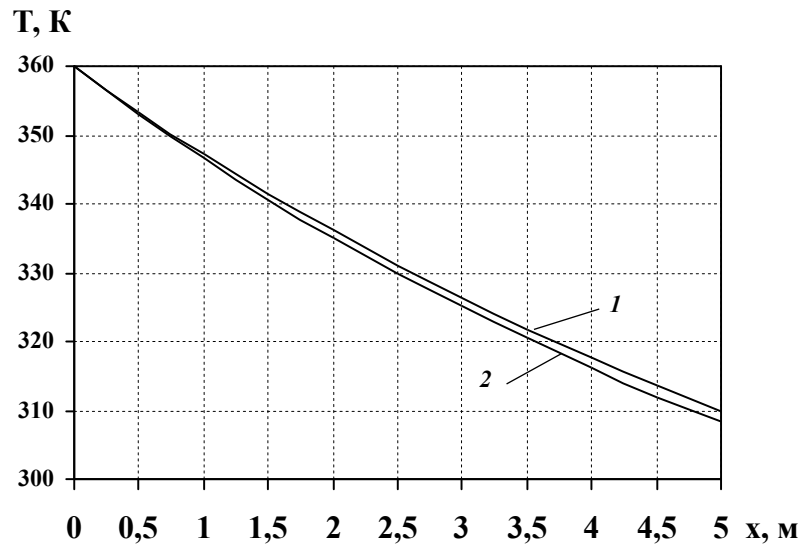


Рис.4. Изменение температуры по длине распространения пленки (1 – с учетом взаимного переоблучения между соседними каплями; 2 – без учета переоблучения).

Из графика следует, что в принятой схеме генерации потока, характеризуемой расстояниями между центрами соседних капель, влияние взаимного переоблучения между каплями сказывается незначительно. Тепловая мощность, отводимая от одной струйки излучателя, составляет 2,25 Вт. Общее количество струек, необходимое для сброса проектируемой мощности – 36000. Размер пленки в поперечном направлении равен 0,95 м.

Список литературы

1. Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев. Перспективные системы отвода тепла для космических энергетических установок // Известия РАН. Серия «Энергетика». 2004, № 5.
 2. Джонс Л.Р. Угловые коэффициенты излучения между двумя сферами // Теплопередача, 1965, т. 88, № 3.
-

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.

HEAT EXCHANGE VIA RADIATION DISPERSED THERMAL LIQUID OF SPACECRAFTS

G.V. Konioukhov, A.A. Koroteev

Method of liquid droplet radiator's shroud radiative cooling calculation is presented. In the case of optical transparency in one direction, the possibilities of simplified method's realization are considered.