

УДК 629.78.05; 629.76.05

**Расчёт максимальной тепловой мощности
космического капельного холодильника-излучателя**

Сафронов А. А.

*Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, ул. Онежская, 8, Москва,
125438, Россия*

e-mail: safrandrey@gmail.com

Аннотация

Рассматривается новый тип космических излучателей, основанных на явлении радиационного охлаждения капельной пелены рабочего тела, распространяющейся в космическом пространстве между генератором капель и каплесборником. Исследуются энергетические характеристики капельных холодильников - излучателей. Рассчитывается зависимость максимальной тепловой мощности, отводимой космическим капельным холодильником – излучателем, от внешних параметров.

Ключевые слова:

капельный холодильник – излучатель, тепловая мощность

Одной из основных тенденций развития современной космонавтики является увеличение энерговооруженности космических аппаратов. Для получения приемлемых значений КПД космических энергоустановок (КЭУ) необходим эффективный сброс низкопотенциального тепла, осуществляемый излучением с помощью холодильников-излучателей (ХИ). Тепловой поток с поверхности излучающего тела пропорционален произведению температуры в четвёртой степени и площади её поверхности. Единственным способом увеличения мощности ХИ при сохранении разности начальной и конечной температуры теплоносителя является увеличение площади излучателя. Для традиционных ХИ это приводит к значительному увеличению массогабаритных параметров КЭУ. Одновременно растёт их микрометеорная уязвимость.

Капельные холодильники-излучатели (КХИ) обладают минимальным тепловым сопротивлением между теплоносителем и излучающей поверхностью, низкой уязвимостью к микрометеорному пробою и малой удельной массой, по оценкам не

превышающей (0,15-0,2) кг/кВт [1, 2]. Их использование позволяет существенно увеличить массовую долю полезной нагрузки космического летательного аппарата.

Данная работа направлена на решение задачи расчета максимальной тепловой мощности КХИ при заданных схеме работы, размерах, начальной и конечной температурах теплоносителя. Используются приближения геометрической оптики, обеспечивающие достаточную точность при характерных значениях радиуса капель $r \sim 10^{-4}$ м [3]. Температура капли считается постоянной по объёму.

Функционирование КХИ основано на радиационном охлаждении специальным образом сформированного мелкодисперсного капельного потока (капельной пелены) теплоносителя при его распространении от генератора к каплесборнику. Условием для формирования капельного потока служит обеспечение отведения заданной радиационной мощности с КХИ.

Капельная пелена представляет собой объединение всех капель диспергированного теплоносителя, находящихся в фиксированный момент времени на участке свободного полёта от всех генераторов ко всем каплесборникам. Группа принадлежащих капельной пелене капель, обладающих одинаковыми размерами и положениями относительно других капель, называется частью капельной пелены. Отдельная капля - наименьшая часть капельной пелены.

Капельной стружкой называется совокупность капель, вещество которых испущено одним отверстием в генераторе капель, находящихся в фиксированный момент времени на участке свободного полёта от генератора к функционирующему совместно с ним каплесборнику. Длиной капельной стружки называется расстояние между центрами наиболее далеко расположенных капель, принадлежащих капельной стружке, осью – траектория центра масс одной из принадлежащих ей капель. Размеры капель и расстояние между каплями в одной капельной стружке определяется методом получения капель, конструкцией генератора капельного потока.

Капельной плоскостью называется совокупность параллельно распространяющихся одинаковых капельных струек, истекающих из отверстий одного или нескольких генераторов капель, центры которых принадлежат одной прямой. Расстояния между соседними капельными стружками в капельной плоскости предполагаются равными и определяются расположением отверстий в генераторе капельного потока. Длиной капельной плоскости называется длина составляющих её капельных струек, шириной – расстояние между наиболее далеко расположенными отверстиями в одном или нескольких генераторах капельного потока, создающем капельную плоскость.

Структурой капельной пелены называется совокупность капельных плоскостей, в которой расстояние между соседними капельными плоскостями много меньше длины и ширины составляющих её капельных плоскостей и сравнимо с расстоянием между наиболее далеко расположенными плоскостями. Расстояние между капельными плоскостями определяется расположением отверстий в генераторах капельного потока.

Элементом конфигурации КХИ (рис. 1) называется совокупность капельного потока с постоянной по объёму структурой, одного или нескольких генераторов капель, создающих этот капельный поток и совместно работающего с генераторами каплесборника. Конфигурация КХИ определяется числом, формой, размером и взаимным расположением элементов конфигурации (рис. 2). На рис. 2 приведена схема капельного холодильника-излучателя с капельной пеленой конфигурации «крест», состоящей из четырёх элементов конфигурации.

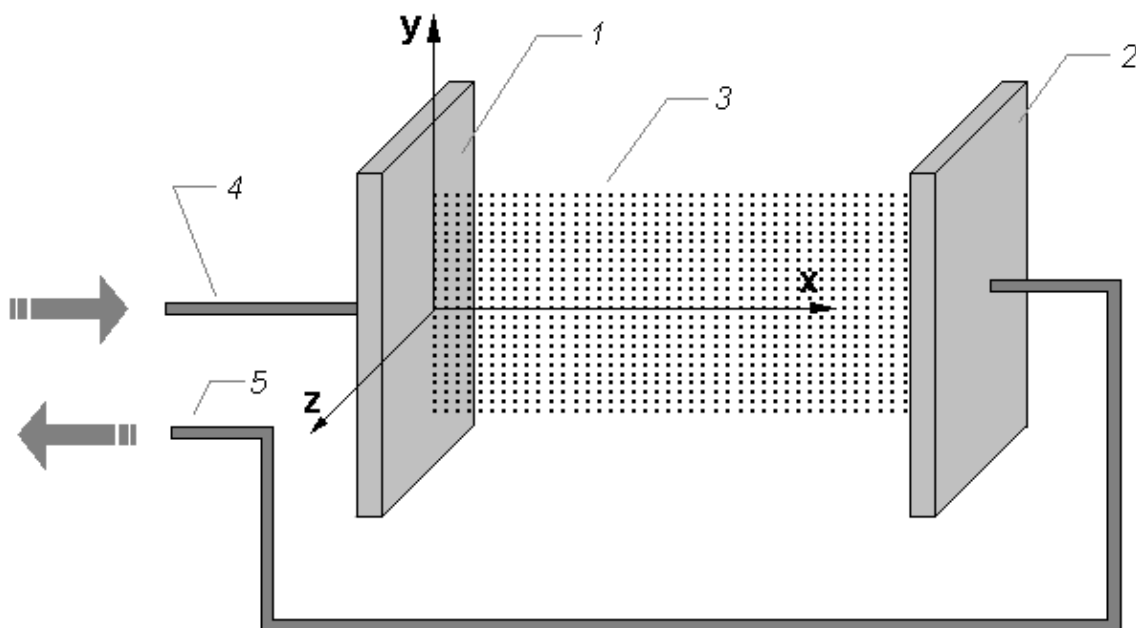


Рис. 1. Элемент конфигурации КХИ со структурой, состоящей из одной капельной плоскости с подводящим и отводящим трубопроводами. 1 – генератор капельного потока; 2 – гидросборник; 3 – капельная пелена, состоящая из одной капельной плоскости; 4, 5 – трубопровод.

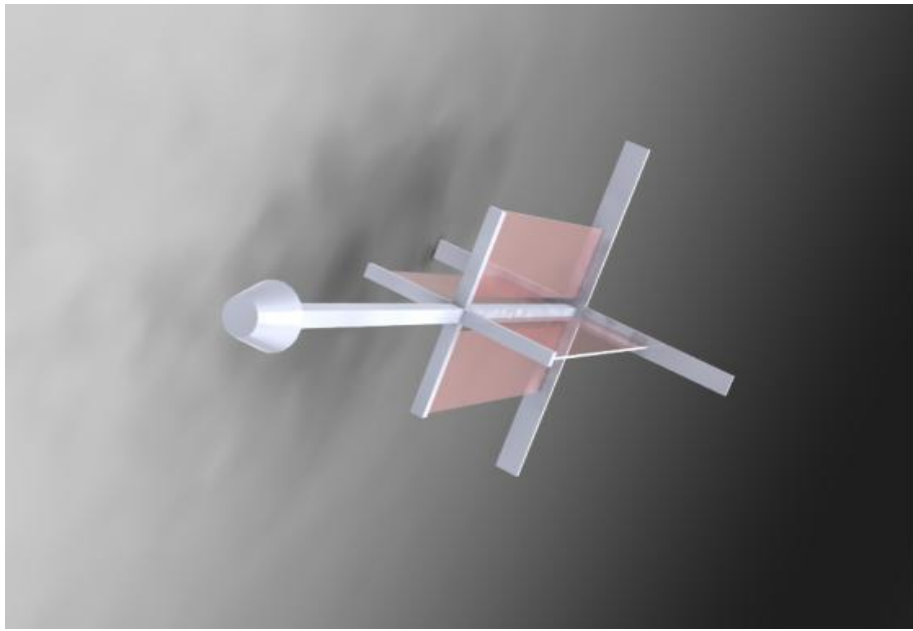


Рис. 2. Конфигурация КХИ типа «крест», состоящей из четырёх элементов конфигурации.

Идеальной называется структура, у которой при радиационном остывании градиент температуры по толщине равен нулю, излучение с единицы площади эквивалентно излучению полностью заполненной плоскости единичной площади, сделанной из того же вещества, что и капли структуры. Основная характеристика идеальной структуры – масса, приходящаяся на единицу площади поверхности – $\left(\frac{m}{S}\right)_{ид}$, в соответствии с законами теплового излучения равна

$$\left(\frac{m}{S}\right)_{ид} = \frac{T_K^3 T_0^3}{T_0^3 - T_K^3} \frac{6l\sigma\varepsilon}{u}, \quad (1)$$

где T_0 – начальная температура капель, T_K – конечная температура капель, l – пролётная длина капель в КХИ, u – скорость капель, σ – постоянная Стефана – Больцмана, ε – интегральная степень черноты рабочего тела.

Вводится понятие степени идеальности структуры капельной пелены как отношение массы располагаемой (построенной) структуры, приходящейся на единицу площади излучающей поверхности к поверхностной плотности массы идеальной структуры. Капельная пелена моделируется плоскостью, обладающей некоторыми оптическими, механическими и электрофизическими свойствами.

$$\eta = \frac{\left(\frac{m}{S}\right)_{расп}}{\left(\frac{m}{S}\right)_{ид}} \quad (2)$$

Любая построенная структура уступает идеальной структуре. Возможности построения структуры ограничены исходными данными для проектирования КХИ (теплофизические параметры рабочего тела, наименьший размер капель, используемый в

КХИ и др.). Из множества всех структур, построенных с учётом исходных данных, выберем наилучшие структуры, обладающие наибольшим значением степени идеальности η_n .

В капельной пелене на единицу длины приходится значительное количество капель, характеризующихся определенной зависимостью температуры от времени. Капли переоблучаются друг с другом, происходит их взаимное затенение. Задача расчёта поля температуры является задачей статистической физики, решать которую надо используя соответствующие методы.

Для нахождения приближённых зависимостей, описывающих процесс остывания капельной пелены, вводится упрощающее предположение о том, что поле температуры в каждой из капельных плоскостей зависит только от продольной координаты. Температуры в разных капельных плоскостях могут различаться. Капли движутся от генератора к каплесборнику с постоянной скоростью. В выбранной системе координат ось x направлена по направлению движения капель, y – параллельно капельным плоскостям, z – ортогонально капельным плоскостям (рис. 1).

Схема индексации капель представлена на рис. 3. Пусть i – номер капли в капельной пелене.

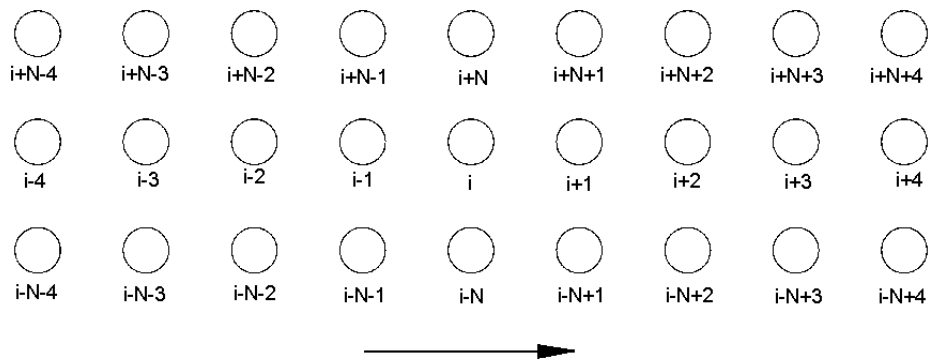


Рис. 3. Индексация капель. В каждой капельной струе находится N капель.

Капельная пелена движется слева направо. В центре рисунка изображена i – тая капля.

Время остывания капли однозначно связано с её координатой. Процесс остывания капель описывается следующей системой уравнений:

$$-\frac{dT_i(x)}{dx} = \frac{3\varepsilon\sigma}{r\rho c} \left(T_i^4(x) - \varepsilon \sum_{j \neq i} \varphi_{i,j} T_j^4(x) \right), \quad (3)$$

где i – индекс капли, r – радиус капли, ρ – плотность рабочего тела, c – теплоёмкость вещества капли, $T_k = T_k(x)$ – температура капли k , $\varphi_{k,l}$ – угловой коэффициент облучения

капли k и капли l . Как видно из уравнения (3), исследуется поле температуры капельной пелены – применён эйлеров подход.

Скажем несколько слов о процедуре индексации капель.

Будем нумеровать не сами капли, а места, где они находятся, в соответствии с эйлеровым подходом. В одной капельной струйке $N=L/\beta r$ таких мест (здесь L - длина капельной струйки, βr – расстояние между каплями в одной капельной струйке, определяемое закономерностями процесса получения капель). Пронумеруем капельные струи произвольным образом. Всего есть m капельных струй. Тогда в пелене всего $m \cdot N$ мест, где могут находиться капли. Пронумеруем эти места следующим образом: $i=m \cdot N+k$, где k - номер места (капли) в капельной струе, отсчитываемый от фильеры генератора, m - номер капельной струи, i - номер капли. Коэффициенты переизлучения имеют определённую симметрию: $\varphi_{j,i+mN+k} = \varphi_{j,i+mN-k}$, где m - целое число, k - достаточно малое целое число.

В случае оптически тонкой пелены, зависимость температуры капли от координаты следующая [4]:

$$\frac{T(x)}{T_0} = \left(1 + x \frac{9\varepsilon\sigma T_0^3}{r\mu c\rho}\right)^{-1/3} \quad (4)$$

где T_0 - начальная температура капли, x - текущая координата.

В качестве примера рассмотрим следующие параметры пелены КХИ. Длина 20 метров, ширина 5 метров, разница температур рабочего тела на входе и выходе холодильника 50 градусов. Такие параметры КХИ, при начальной температуре рабочего тела 360К, позволяют отвести мощность в несколько сот киловатт. Для такой капельной пелены по порядку величины первая и вторая производные температуры по координате равны соответственно

$$\begin{aligned} \left|\frac{dT(x)}{dx}\right| &\simeq 3 \\ \left|\frac{d^2T(x)}{dx^2}\right| &\simeq 10^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

Соотношения (5) дают верхнюю оценку модулей первой и второй производной температуры. Их значения малы. Применим приближение среднего поля [5]. Решение будем искать методом последовательных приближений. Выберем соотношение (4) в качестве нулевого приближением решения системы (3). Найдём первое приближение. Разложим зависимость $T_i^4(x)$ в ряд Тейлора. В силу оценок градиентов поля температуры (5), в этом разложении ограничимся первым членом. Тогда для капель, находящихся в одной струе

$$T_i^4(x) = T_k^4(x - 4.76 r (i - k)) + 4T_k^3(x) \frac{dT(x)}{dx} ((k - i)4.76r). \quad (6)$$

При подстановке этого выражения в формулу (3), в силу симметрии коэффициентов $\varphi_{k,l}$, взаимно уничтожаются все слагаемые, содержащие производную температуры. Зависимость температуры от координаты следующая:

$$\frac{T(x)}{T_0} = \left(1 + x \frac{9\varepsilon\sigma T_0^3}{\rho c_p} (1 - \varepsilon \sum_{j \neq i} \varphi_{i,j}) \right)^{-1/3} \quad (7)$$

Соотношение (7) даёт закон остывания капель с учётом локального переизлучения. Оценим погрешность полученных результатов на модельной задаче. Рассмотрим переоблучение капли с объектом, имеющим угловой коэффициент переоблучения с каплей φ и температуру, в любой момент времени отличающуюся на ΔT_0 от температуры капли. Будем искать погрешность решения уравнения на поле температуры $g(x)$ в виде

$$T(x) = T_0 \left(1 + x \frac{9\varepsilon\sigma T_0^3}{\rho c_p} (1 - \varepsilon\varphi) \right)^{-1/3} + g(x). \quad (8)$$

Тогда погрешность решения ограничивается следующей величиной

$$|g(x)| \leq 4 \frac{3\varepsilon\sigma}{\rho c_p} \varepsilon\varphi T_0^3 \Delta T_0 x. \quad (9)$$

Для КХИ, обладающим исследуемыми ниже параметрами, характерная величина ошибки $g(x)$ не превышает

$$|g(x)| \leq 0.01 \Delta T_0 x. \quad (10)$$

Для расчёта структуры необходимо знать закономерности переоблучения капель. Переоблучение описывается с помощью угловых коэффициентов переоблучения поверхностей. Рассчитывать переоблучение каждой капли с каждой неприемлемо не только технически, но и принципиально: при малом изменении геометрии могут существенно измениться коэффициенты переоблучения. Рационально изучать переоблучение капли с некоторым элементом капельной пелены, состоящим из большого количества капель. При этом коэффициенты переоблучения устойчивы к малым изменениям геометрии. Так как структура пелены состоит из капельных плоскостей, то основа расчёта переоблучения пелены и капли строится на исследовании переоблучение капли и капельной плоскости. Для этого обобщается понятие коэффициента переоблучения путём введения его функции распределения. Традиционно изучается переоблучение только между простыми непрерывными поверхностями. При этом коэффициент переоблучения определяется как двукратный интеграл Римана по простым односвязным областям [6]. В основе применения этого способа вычисления коэффициента переоблучения лежит предположение о непрерывности распределения меры

коэффициента переизлучения. При этом для описания распределения коэффициента переоблучения применимо понятие меры Жордана [7]. Не будем требовать непрерывность распределения меры. Пусть рассматриваемая мера распределена по пространству разрывно, в том числе фрактально, стохастично. Откажемся от принадлежности функции распределения меры множеству классических функций. Будем рассматривать обобщённые функции распределения меры. Для изучения такого распределения коэффициента переизлучения необходимо применять понятие меры Лебега и интеграл Лебега [7], с помощью которых вводится понятие функция распределения коэффициента переоблучения.

Введём функцию распределения коэффициента переоблучения $f(\theta, \psi)$, удовлетворяющую следующим условиям:

$$\varphi = \lim_{\Delta\theta \times \Delta\psi \rightarrow 0} \frac{\sum_{[\theta, \psi]} [\Delta\psi \times \Delta\theta] f(\theta, \psi) \sin \theta}{4\pi} \quad (11)$$

$$\rho(\theta, \psi) = \sin \theta f(\theta, \psi) \frac{1}{4\pi} \quad (12)$$

$$\varphi = \int \rho(\theta, \psi) d\psi d\theta \quad (13)$$

где r, θ, ψ – сферические координаты точки с полюсом, совпадающим с центром исследуемой капли, $\Delta\theta \times \Delta\psi$ – элемент покрытия пространства [7].

В общем случае $f = f(r, \theta, \psi)$. Переоблучения капли с капельной пленкой описывается функцией распределения коэффициента переоблучения капельной пленки $\rho(\theta, \psi)$. Основой для вычисления $\rho(\theta, \psi)$ является функция $f(r, \theta, \psi)$ отдельной капельной плоскости. При больших расстояниях между переоблучающейся каплей и капельной плоскостью функция распределения коэффициента переоблучения выходит на асимптотические значения и зависит только от угловых координат. В асимптотическом случае для геометрически подобных капельных плоскостей $f(\theta, \psi)$ совпадают.

Возможны различные методы для вычисления функции распределения коэффициента переоблучения, позволяющие решить задачу переоблучения капель в пленке: численные методы, статистические методы, методы редукции размерности задачи. Существуют программы, основанные на этих методах, позволяющие рассчитывать переоблучение капель в пленке, рассчитывать структуру капельной пленки, обладающую заданными свойствами [8,9]. С помощью этих программ получены следующие результаты.

Радиус капли при фиксированной начальной и конечной температуре и времени высвечивания однозначно связан с полным коэффициентом переоблучения $\varphi_{k \rightarrow n}$, равным $\sum_{j \neq i} \varphi_{i,j}$ (см. зависимость (7)). Коэффициент $\varphi_{k \rightarrow n}$ однозначно связан с эффективностью

структуры капельной пелены η . Поэтому наилучшее η , которое возможно построить есть функция от $\frac{r_{min}}{r_0}$

$$\eta_H = \eta\left(\frac{r_{min}}{r_0}\right) \quad (14)$$

где $r_0 = \frac{T_K^3 T_0^3}{T_0^3 - T_K^3} \frac{31\sigma\varepsilon}{\rho c_p}$ – радиус капли, остывающей без переоблучения с другими объектами.

Численный расчёт зависимости $\eta_H = \eta\left(\frac{r_{min}}{r_0}\right)$ приведён на рис. 4. Погрешность, вызванная недостаточной точностью расчёта коэффициента переоблучения равна $\Delta\eta = 0,025$. Внутренние многократные отражения в структуре, не учтённые в расчёте, могут увеличивать степень идеальности на несколько процентов.

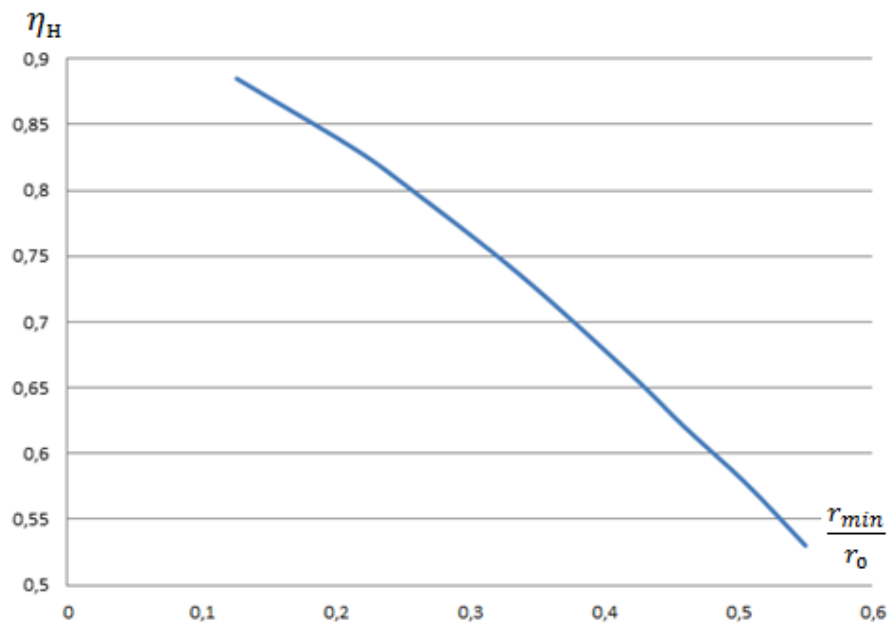


Рис. 4. Результаты численного расчёта эффективности наилучшей структуры.

Ранее показано (формулы (7), (8), (10)), что поле температуры в капельной пелене описывается следующей зависимостью, определяемой только закономерностями радиационного охлаждения

$$T(x) = T_0(1 + const x)^{-1/3} \quad (15)$$

Необходимо охладить рабочее тело с температуры T_0 до T_K на пролётной длине l_x . Из этого условия однозначно определяется значение константы в формуле (15).

Рассмотрим элемент конфигурации шириной l_y , длиной пролёта капель l_x с капельной пеленой, обладающей степенью идеальности η , полем температуры,

описываемым соотношением (15). Согласно законам теплового излучения, такой элемент конфигурации излучает тепловую мощность

$$P = 2l_x l_y \eta \left(\frac{r_{\min}}{r_0} \right) \sigma T_0^4 \left[3 \frac{1 - \frac{T_K}{T_0}}{\left(\frac{T_0}{T_K} \right)^3 - 1} \right] \quad (16)$$

При использовании КХИ задаётся начальная и конечная температура рабочего тела. Поэтому мощность, отводимая с элемента конфигурации КХИ зависит только от его площади, наименьшего размера капель, использованного для построения структуры и степени черноты рабочего тела.

Конфигурация имеет большое влияние на его полную тепловую мощность. Учёт влияния элементов конфигурации друг на друга производится с помощью расчёта угловых коэффициентов взаимного переоблучения различных элементов конфигурации. Коэффициенты переоблучения элементов конфигурации КХИ вычисляются следующим образом. Вначале рассчитываются коэффициенты переоблучения пелён в предположении их сплошности и равенства коэффициентов φ_0 для каждой пелены. Затем, используя определение углового коэффициента переоблучения поверхностей [6], рассчитываем коэффициенты переоблучения пелён по следующей формуле

$$\varphi = \eta \varphi_0 . \quad (17)$$

Зная коэффициенты переоблучения, применив метод Гибхарта [6] получаем, что, с учётом рассеяний и многократных отражений, с КХИ в космос уходит следующая доля излучённой энергии

$$G_{\text{КХИ}} = \frac{1 - \varphi}{1 - (1 - \varepsilon)\varphi} = \frac{1 - \eta \varphi_0}{1 - (1 - \varepsilon)\eta \varphi_0} \quad (18)$$

С учётом этого отводимая мощность

$$P = 2l_x l_{y\Sigma} \eta \left(\frac{r_{\min}}{r_0} \right) \sigma T_0^4 \left[3 \frac{1 - \frac{T_K}{T_0}}{\left(\frac{T_0}{T_K} \right)^3 - 1} \right] \frac{1 - \eta \left(\frac{r_{\min}}{r_0} \right) \varphi_0}{1 - (1 - \varepsilon)\eta \left(\frac{r_{\min}}{r_0} \right) \varphi_0} \quad (19)$$

где $l_{y\Sigma}$ – сумма l_y всех элементов конфигурации, составляющих КХИ. Для случая конфигурации крест, $r_{\min}=10^{-4}$ м, $c=1700$ Дж/кг К, $\rho=1000$ кг/м³, $l_x=25$ м, $l_y=5.5$ м, $l_{y\Sigma}=22$ м $\Delta T=50$ К, зависимость отводимой мощности от начальной температуры рабочего тела показана на рис. 5.

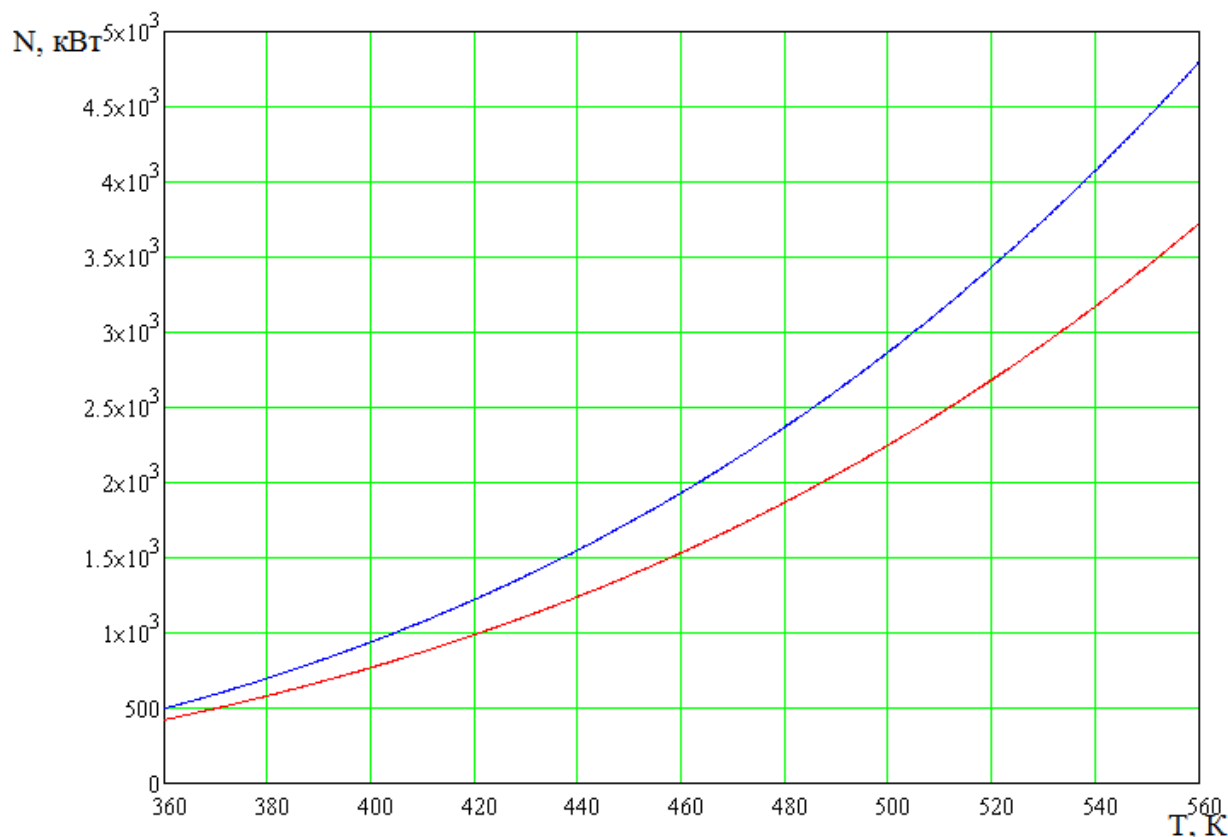


Рис. 5. Зависимость тепловой мощности, отводимой с помощью КХИ от начальной температуры рабочего тела при перепаде температуры рабочего тела 50К:

- - с учётом переоблучения элементов конфигурации,
- - без учёта переоблучения элементов конфигурации.

Эффективность построенной структуры пелены КХИ определяется размером наименьших капель, использованных для её построения. Для повышения эффективности структуры возможно использовать следующий приём: за счёт изменения последовательности работы элементов конфигурации с параллельной на последовательную искусственно увеличить пролётную длину капель, тем самым увеличив значение r_0 . При этом отношение $\frac{r_{min}}{r_0}$ уменьшится и, как видно из рис. 4, степень идеальности структуры возрастёт.

Таким образом, тепловая мощность, отводимая с помощью КХИ, при правильной организации процесса остывания рабочего тела, зависит только от площади КХИ, конфигурации, начальной и конечной температуры рабочего тела и наименьшего размера капель.

Список литературы

1. Конюхов Г.В., Баушев Б.Н. и др. Капельный холодильник – излучатель для космических энергетических установок. IV Минский Международный форум, т.Х, Минск, 2000.
 2. Ю.Г.Демянко, Г.В. Конюхов, А.С. Коротеев, Е.П. Кузьмин, А.А. Павельев Ядерные ракетные двигатели. М.: ООО «Норма-Информ», 2001.
 3. Г. Ванн де Хюлст Рассеяние света малыми частицами. Издательство иностранной литературы Москва 1961.
 4. Коротеев А.А. Капельные холодильники – излучатели космических энергетических установок нового поколения. - М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2008.
 5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, ч. 2, М., 1978
 6. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. - М.: Мир, 1975.
 7. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. - изд. четвёртое, переработанное. — М.: Наука, 1976.
 8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. №2012616600. Тепловой расчёт и оптимизация капельной пелены бескаркасного космического излучателя нового поколения / Коротеев А.А., Сафронов А.А.; Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».
 9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. №2012616599. Расчёт углового коэффициента переоблучения различных частей монодисперсной пелены капельных холодильников – излучателей космических энергетических установок нового поколения / Балашов С.С., Коротеев А.А., Сафронов А.А.; Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».
-