

УДК 62-714.1

СТРУЙНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА РАБОЧИХ ТЕЛ (ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ) И РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАПЕЛЬНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ-ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2010 С.С. Раубе, Е.К. Красночуб, В.М. Бронштейн

ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

С использованием схемы лучистого теплообмена между неограниченной плоскостью и рядами труб в параллельных плоскостях рассмотрен теплообмен струйной пелены теплоносителя, движущейся в продольном направлении из фильер капельного холодильника-излучателя и истекающей в космическое пространство. Предложена расчётная схема изменения температуры при охлаждении струйной пелены в космосе. Приведены расчётные формулы для определения текущей и средней температур теплоносителя по длине пелены, а также длина пелены в зависимости от тепловой нагрузки от системы обеспечения теплового режима (СОТР) космического аппарата (КА).

Капельный холодильник-излучатель, радиатор, система обеспечения теплового режима, термостатирование, теплообмен

Постановка задачи. В работе предлагается математическая модель теплообмена для расчёта основных параметров нового типа космических излучателей, основанных на явлении радиационного охлаждения специальным образом сформированной мелкодисперсной пелены рабочего тела, распространяющейся в космосе между генератором и гидросборником капельного холодильника-излучателя (КХИ).

В настоящее время существует объективная необходимость увеличения энерговооружённости КА, предназначенных не только для исследования дальнего космоса, но и аппаратов, эксплуатирующихся на околоземных орбитах и выполняющих задачи мониторинга, связи, навигации и другие задачи. Существуют также проекты космических энергоустановок с мощностями от сотен киловатт до мегаватт. Однако принципиальной особенностью и трудностью на пути создания подобных систем является разработка устройств сброса тепла.

Для получения приемлемых КПД космических энергетических систем необходим отвод тепла из низкотемпературной части цикла. В настоящее время отвод тепла

осуществляется с помощью панелей с жидкостными каналами или с тепловыми трубами. С увеличением мощности их масса составляет всё более заметную долю в общей массе энергетической системы. Преимуществами таких конструкций являются простота и технологичность; недостатками – большая масса из-за метеоритной уязвимости.

Генерация капельного потока горячего теплоносителя может осуществляться методом вынужденного капиллярного распада в генераторе капель. Распад инициируется возмущениями, источником которых могут быть колебания пьезоэлемента, соединённого с генератором звуковой частоты.

Выбор рабочего тела (теплоносителя) капельного холодильника-излучателя зависит от температурного режима и давления насыщения теплоносителя. При 300-450 К применяются кремнийорганические (силиконовые) и вакуумные масла, при более высоких температурах – жидкие металлы.

Важнейшей характеристикой радиатора является его удельная масса, т. е. масса, приходящаяся на единицу площади излучательной поверхности.

Влиятельным фактором, оказывающим воздействие на конструирование КХИ, является также потеря массы в процессе испарения теплоносителя.

Капельные радиаторы могут применяться в широком диапазоне прикладных задач: отвод тепла в высокотемпературных тепловых двигателях, охлаждение фотоэлементов, отвод тепла от рефрижераторов, в которых температуры отвода тепла находятся в диапазоне 250-350 К. В дальнейшем будет рассматриваться применение КХИ на маломощных КА дистанционного зондирования Земли. В случае отвода тепла при температурах порядка 300 К для применения в КХИ пригодно кремниевое диффузное масло Dow 705 (Dow Corning® 705), обладающее наиболее низким среди известных масел давлением насыщенных паров (порядка $3 \cdot 10^{-10}$ торр).

По сравнению с традиционными радиаторами-охладителями КХИ обладает существенными преимуществами:

- излучающая поверхность защищена от прокола небольшими частицами и оружием направленной энергии;

- оптические коэффициенты излучающей поверхности практически постоянны;

- радиаторы КХИ легки, так как на данную излучающую площадь требуется незначительная масса жидкости, и для защиты от проколов и пробоев не требуется бронирование.

В основе расчётов теплообмена капельного слоя принимаются следующие допущения:

- потери рабочего тепла происходят, главным образом, за счёт испарения и точности прицеливания;

- допустимая тепловая нагрузка радиатора принимается постоянной в течение всего срока службы;

- температура капель жидкости близка к температуре нижнего предела работоспособности охлаждаемой системы.

На рисунке 1 представлена первоначальная конфигурация КХИ и основные его элементы. Жидкостно-жидкостный теплообменник (ЖЖТ) входит в рассматриваемую модель функционально, и его наличие зависит от типа системы обеспечения теплового режима и специфики полета КА.

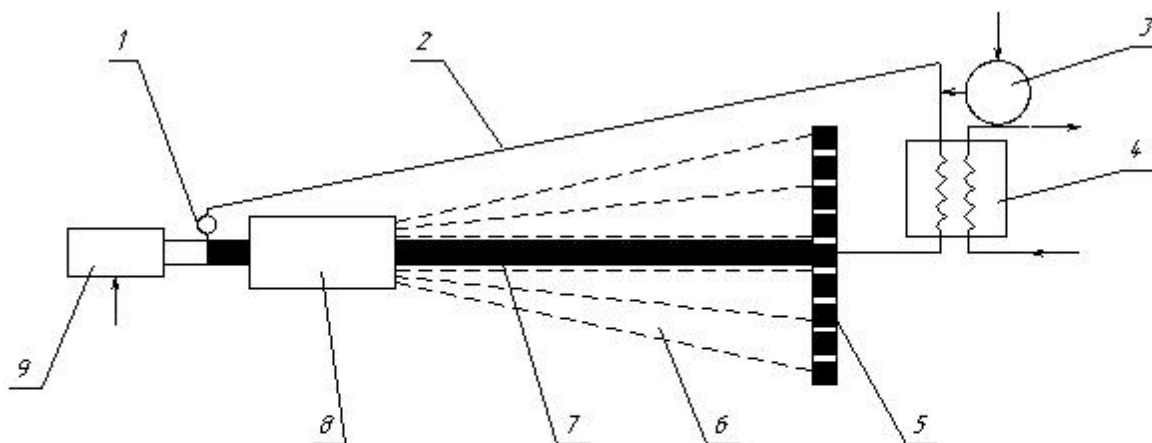


Рисунок 1-Принципиальная схема устройства капельного холодильника-излучателя
 1-гидравлический насос, 2-сливной трубопровод, 3-подпитывающее устройство с запасом рабочей жидкости, 4-жидкостно-жидкостный теплообменник, 5-генератор мелкодисперсных капель теплоносителя, 6-капельная пелена, 7-силовая конструкция, 8-вращающийся коллектор, 9-электродвигатель

Распад струи жидкости на капли может происходить в соплах с диаметром не менее 4-5 мкм, при этом радиус капли

после выхода из сопла в 2 раза превышает радиус сопла. Общее количество отверстий (сопел, фильер)

находится в прямой зависимости от следующих параметров КХИ: излучаемой мощности, массового расхода потока теплоносителя, размера капли, температуры и свойств материала капли. Расход потока через сопло определяется давлением и плотностью жидкости и геометрическими параметрами сопла.

Внедрение КХИ может значительно снизить массу радиационных систем по сравнению с массами современных радиационных систем с тепловыми трубами или с излучателями с жидкостными контурами.

Под действием давления рабочая жидкость из каждого отверстия генератора капель вытекает в виде сплошной струи, но ввиду присущей жидкости внутренней неустойчивости струя на расстоянии ~ 10 см от места истечения автоматически распадается на отдельные капли. Пьезоэлектрический преобразователь, периодически действующий на истекающую струю, с высокой точностью определяет её распад. Все образованные таким образом капли имеют одинаковую скорость в диапазоне примерно 2-15 м/с. Поток капель можно точно направить в заданную точку. Были рассчитаны характерные времена начала разрушения для струи масла DC-704 и воды при $T=300$ К. Для масла DC-704 и при диаметре невозмущенной струи 100 мкм оно составляет $5 \cdot 10^{-2}$ с [4, 7].

Первые сведения о КХИ появились в американской печати в 80-х годах [1-7]. В 80-90 г.г (1988-1993 г.г.) ЦСКБ совместно с кооперацией (Институт ядерной энергетики АН БССР, Московский энергетический институт) согласно решению директивных органов должно было провести НИР «Фозт-БН». Предполагалось провести исследования проблем отвода большого количества тепла в космическое пространство для создания малогабаритных высокоэффективных излучателей перспективных КА. Внедрение результатов НИР предполагалось провести в ЦСКБ. Однако были проведены только информационные исследования по проблеме создания

высокоэффективных излучателей, включая КХИ.

В работах [9-14] рассмотрены перспективные системы отвода тепла в теплообменных устройствах космического назначения на основе капельных потоков. Предложены методы расчета характеристик КХИ, проведены разработка и экспериментальная отработка их основных элементов, обеспечивающих протекание рабочего процесса (в том числе космический эксперимент на орбитальном комплексе «МИР» [13]) в космосе и при реализации наземных технологических процессов, основанных на использовании монодисперсного вещества.

При рассмотрении излучения капельной пелены Конюхов Г. В. с соавторами [9-12, 14] предполагали, что пелена имеет форму прямоугольного параллелепипеда и состоит из движущихся в направлении продольной оси с постоянной скоростью монодисперсных сферических капель, имеющих определённую концентрацию в пелене и радиус. Пелена разбивалась на определённые ячейки. Капли излучают по закону Стефана-Больцмана. Интенсивность излучения определяется законом Планка. Использовано предположение о монохроматическом характере излучения капель. Считалось, что энергия излучается ячейкой (элементарным объемом) по случайным направлениям, а носителем энергии является некоторая модельная «частица», не имеющая массы и переносящая соответствующую порцию энергии. Движение «частицы» в пелене происходит с рассеиванием и поглощением на каплях, описываемых теорией Ми.

В работах [9-12, 14] с помощью разработанных программ проведены расчёты по определению температурных и энергетических характеристик капельной пелены теплоносителя КХИ.

Предлагаемая математическая модель теплообмена рабочего тела (теплоносителя) КХИ. Будем считать, что вблизи генератора струя не распадается на капли, и пелена

теплоносителя представляет собой отдельные сплошные струи, истекающие из большого количества отверстий в генераторе.

С помощью генератора и гидросборника осуществляется формирование струйной пелены горячего теплоносителя. Пелена состоит из отдельных струй, количество которых определяется требуемой величиной отводимой тепловой мощности. Охлаждение рабочего тела происходит при движении струйной пелены от генератора к гидросборнику.

Предлагается следующая математическая модель теплообмена N рядов жидких струй, истекающих в космическое пространство, имеющего температуру T_0 и степень черноты $\epsilon_0=1$, предлагаем следующей.

Космическое пространство как излучатель примем в виде неограниченной плоскости, отстоящей от каждой теплоотдающей поверхности струйной пелены и излучающей по закону Стефана-Больцмана. При такой постановке задачу теплообмена теплоносителя и космического пространства можно рассматривать как задачу теплообмена излучением между неограниченной плоскостью 1 и n рядом труб 2 в параллельных плоскостях (рисунок 2) [15].

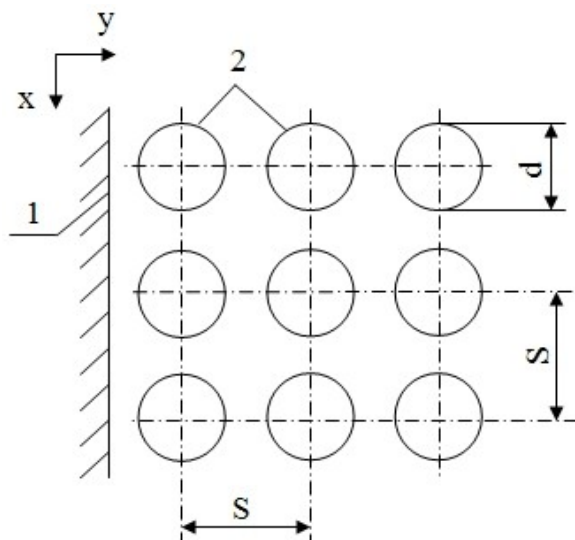


Рисунок 2 – Схема взаимных поверхностей для расчета коэффициентов облученности

Угловой коэффициент системы φ_{12} для n рядов труб равен:

$$j_{12} = 1 - (1 - j'_{12})^n. \quad (1)$$

Здесь j'_{12} - угловой коэффициент для одного ряда труб:

$$j'_{12} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{S}\right)^2} + \frac{d}{S} \arctg \sqrt{\left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1}, \quad (2)$$

где d, S – соответственно диаметр и шаг труб.

Рассчитаем лучистый теплообмен между одним рядом труб и неограниченной плоскостью 1, параллельной ему. Температура и степень черноты плоскости T_1, ϵ_1 , температура и степень черноты поверхности труб T_2, ϵ_2 . Согласно свойству совмещаемости лучистых потоков вместо отстоящей от труб параллельной плоскости 1 можно рассматривать плоскость, касательную к трубам. Тогда эта плоскость совместно с поверхностями двух рядов стоящих труб образует замкнутую систему AA_1BC (рисунок 3), для расчёта которой можно воспользоваться формулой для приведённой степени черноты ϵ_{np} :

$$\epsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) j_{12} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) j_{21}}. \quad (3)$$

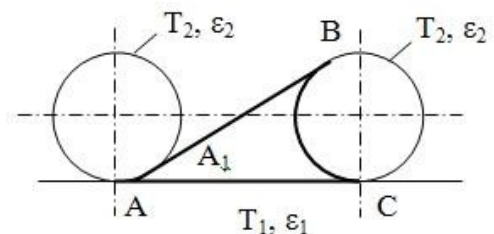


Рисунок 3 – К расчёту теплообмена излучением между бесконечной плоскостью и рядом труб

Взаимная поверхность излучения, отнесенная к единице длины трубы, равна:

$$H_{12} = H_{21} = j_{12}S = j_{21}pd; \quad (4)$$

$$j_{21} = \frac{j_{12}S}{pd}; \quad (5)$$

$$Q_{12} = e_{np} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) H_{12}. \quad (6)$$

Здесь Q_{12} – результирующий тепловой поток на единицу длины труб между плоскостью 1 и рядом труб 2, Вт/м;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma_0 = 5,6693 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴.

При рассмотрении теплообмена пелены теплоносителя и космического пространства в прямоугольной системе координат X, Y, Z будем предполагать, что пелена имеет форму прямоугольного параллелепипеда и состоит из N_y рядов сплошных однорядных струй диаметром d в параллельных плоскостях, движущихся в направлении оси Z с постоянной скоростью u и истекающих в космическое пространство. N_x – количество рядов струй в направлении оси X . Расстояние между струями по оси X равно S_x , по Y – S_y . В математической модели принимаем, что $S_x = S_y = S$ (рисунок 4).

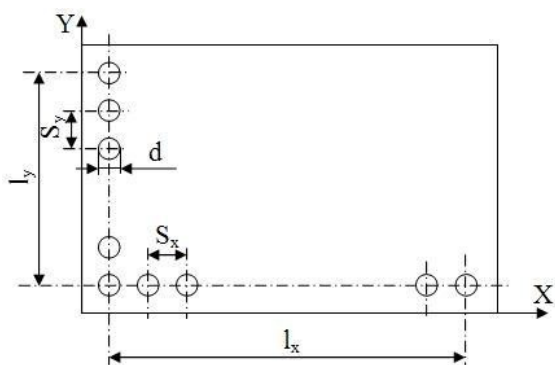


Рисунок 4 – Поперечное сечение струйной пелены

Размеры пелены в направлении координатных осей X, Y, Z принимаем равными соответственно l_x, l_y, l_z .

$$l_x = (N_x - 1)S_x; \quad l_y = (N_y - 1)S_y.$$

Температура струй на выходе из струйного генератора T_1 , температура струй на входе в гидросборник T_2 ,

текущая температура струи $T_f = T_f(z)$. Удельная теплоёмкость жидкости c_p , коэффициенты излучения поверхности жидкой струи ε_2 , струйной пелены ε_{np} . Температуру пелены на входе в гидросборник T_2 , текущую температуру пелены T_f по длине z , средние температуры $\overline{T_f}$ пелены на длине z , считая, что температуры вдоль координатных осей X, Y равны, будем определять следующим образом (рисунок 5).

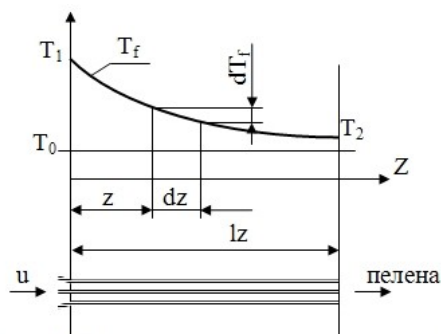


Рисунок 5 – Схема изменения температуры струйной пелены T_f при охлаждении ее в космосе при температуре T_0

В случае, когда l_x, l_y намного меньше l_z , теплообменом со стороны боковых поверхностей пелены можно пренебречь. Рассмотрим более общую задачу с учётом теплообмена боковой поверхности пелены и космического пространства при температуре T_0 . Выделим бесконечно малый отрезок пелены dz с боковой поверхностью $2[(N_x - 1) + (N_y - 1)]Sdz$ и напишем для него уравнение теплового баланса:

$$dQ = -Gc_p dT_f = 2e_{np} \sigma_0 (T_f^4 - T_0^4) \times j_{12} S [(N_x - 1) + (N_y - 1)] dz. \quad (7)$$

Следует отметить, что охлаждение пелены проводится с обеих сторон пелены. Q – количество тепла, сбрасываемое теплоносителем в космическое пространство в единицу времени, Вт; G – общий расход теплоносителя, кг/с; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²К⁴; φ_{12} – угловой коэффициент излучения между космическим пространством и струйной пеленой; S – расстояние между струями.

Далее:

$$-Gc_p dT_f = 2e_{np} S \mathbf{j}_{12} (T_f^4 - T_0^4) \times \times [(N_x - 1) + (N_y - 1)] S dz. \quad (8)$$

Обозначая:

$$\frac{2e_{np} S \mathbf{j}_{12} [(N_x - 1) + (N_y - 1)] S}{Gc_p} = A, \quad (9)$$

получим:

$$-dT_f = A(T_f^4 - T_0^4) dz. \quad (10)$$

Разделяем переменные:

$$\frac{dT_f}{T_f^4 - T_0^4} = -A dz. \quad (11)$$

Интегрируем:

$$\int_{T_1}^{T_f} \frac{dT_f}{T_f^4 - T_0^4} = -A \int_0^z dz. \quad (12)$$

Имеем /16/:

$$\int \frac{dT_f}{T_f^4 - T_0^4} = -\frac{1}{4T_0^3} \ln \left| \frac{T_0 + T_f}{T_0 - T_f} \right| - \frac{1}{2T_0^3} \operatorname{arctg} \frac{T_f}{T_0}. \quad (13)$$

Полученное выражение первообразной [13] представляет собой достаточно сложную функцию. Это обстоятельство только затрудняет задачу, но практически не влияет на точность требуемых решений, так как $T_0 \ll T_f$. Температуру космического пространства принимаем $T_0 = 0$ К.

Тогда из (12) получаем:

$$\int_{T_1}^{T_f} \frac{dT_f}{T_f^4} = -A \int_0^z dz; \quad (14)$$

$$T_f = T_1 \sqrt[3]{\frac{Gc_p}{6e_{np} S \mathbf{j}_{12} (l_x + l_y) T_1^3 z + Gc_p}}. \quad (15)$$

Среднее значение температуры теплоносителя на длине z :

$$\bar{T}_f = \frac{1}{4e_{np} S \mathbf{j}_{12} (l_x + l_y) T_1^2 z} \times \times \sqrt[3]{Gc_p (6e_{np} S \mathbf{j}_{12} (l_x + l_y) T_1^3 z + Gc_p)}. \quad (16)$$

Из выражения (15) получаем для длины пелены:

$$z = \frac{Gc_p (T_1^3 - T_f^3)}{6e_{np} S \mathbf{j}_{12} (l_x + l_y) T_1^3 T_f^3}. \quad (17)$$

Излучающая площадь пелены равна:

$$F = 2(l_x + l_y)z. \quad (18)$$

Тепловой поток, сбрасываемый теплоносителем в космическое пространство:

$$Q = Gc_p (T_1 - T_f). \quad (19)$$

Тогда:

$$Q = \frac{3e_{np} S \mathbf{j}_{12} T_f^3 T_1^3 F}{T_1^2 + T_1 T_f + T_f^2}; \quad (20)$$

$$z = \frac{Q(T_1^2 + T_1 T_f + T_f^2)}{6e_{np} S \mathbf{j}_{12} (l_x + l_y) T_f^3 T_1^3}. \quad (21)$$

Сброс тепла с единицы площади пелены КХИ:

$$\frac{Q}{F} = \frac{3e_{np} S \mathbf{j}_{12} T_1^3 T_f^3}{T_1^2 + T_1 T_f + T_f^2}. \quad (22)$$

Сравним результаты расчетов по полученным формулам с результатами [12] в соответствии с исходными данными (таблица 1).

Таблица 1 – Исходные данные [12]

Тепло-носитель	c_p , Дж/кг К	ε_2	d , м	S , м	z , м	N_x	N_y	G , кг/с	l_x , м	l_y , м	$l_x + l_y$, м
олово	255	0,15	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10	9	51	0,476	0,16	0,15	0,166
						114	51	6,023	0,23	0,15	0,38
						455	51	24,1	0,91	0,15	1,06

Тогда:

Определим коэффициенты φ'_{12} , φ_{12} , φ_{21} , ε_{np} для многорядного расположения струй. n - число струй по координате Y .

При $\frac{S}{d} = 10$, $n = N_y = 51$.

В соответствии с (2), (1), (5) будем иметь: $\varphi'_{12} = 0,1521$, $\varphi_{12} = 1$, $\varphi_{21} = 3,1831$.

При $\varphi_{21} = 1$, $\varphi_{12} = 1$,

$$\frac{S}{d} = \frac{pj_{21}}{j_{12}} = \frac{p \cdot 1}{1} = p.$$

В случае многорядного расположения струй и $\varphi_{12} = 1$ формула (3)

правомерна при $\frac{S}{d} = 1 \div p$. В противном

случае, при $\frac{S}{d} > p$ необходимо

принимать $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$.

$$e_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{e_2} - 1\right) j_{21}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{e_2} - 1\right) \cdot 1} = e_2.$$

Расчёты температуры на входе в гидросборник КХИ T_2 ; средней температуры по длине пелены ($z = 10$ м) \bar{T}_f ; теплового потока, сбрасываемого теплоносителем КХИ по длине пелены общей площадью излучения F в космическое пространство Q ; средней температуры по длине пелены, подсчитанной по формуле $\bar{T}_f = \frac{T_1 + T_2}{2}$;

удельного теплового потока $\frac{Q}{F}$ для различных размеров ширины пелены, определяемой величинами N_x и N_y , приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов параметров теплоносителя КХИ по исходным данным [12]

N_x	T_2 , К	\bar{T}_f , К	Q , кВт	F , м ²	$\frac{Q}{F}$, $\frac{кВт}{м^2}$	$\frac{T_1 + T_2}{2}$, К
9	838	909,68	19,62	3,32	5,91	919
114	961	980,05	59,66	7,6	7,85	980,5
455	972	983,45	170,28	21,2	77,40	986

При ограничениях на величину T_f (например, на температуру начала кристаллизации теплоносителя) температура T_1 на выходе из генератора не должна быть меньше температуры T_f :

$$T_1 \geq T_f \sqrt[3]{\frac{Gc_p}{Gc_p - 6e_{np} S j_{12} (l_x + l_y) T_f^3 z}}.$$

Температура теплоносителя (жидкое олово) по длине пелены $z = 0 \div 10$ м в зависимости от числа струек N_x приведена в таблице 3. Сравнение

результатов проведённых расчётов и расчётов в [12] приведено в таблице 4.

Результаты наших расчетов теплового потока, сбрасываемого теплоносителем на длине пелены в зависимости от числа струек КХИ, и температура теплоносителя по длине пелены при $N_x = 9$ приведены на рисунках 6, 7. Здесь же нанесены аналогичные зависимости, полученные Конюховым Г.В. с соавторами [12].

Таблица 3 – Результаты расчетов по формуле (15)

Число струек, N_x	Температура теплоносителя T_f , К										
	z=0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	1000	977,8	957,4	938,6	921,2	905,1	890	875,8	862,6	850,1	838
114	1000	995,8	991,7	987,7	983,7	979,8	976	972,2	968,4	964,8	961
455	1000	997,1	994,2	991,4	989	985,8	983	980,3	977,6	975	972

Таблица 4 – Сравнение результатов расчётов

Оптическая толщина, τ	Число струек, N_x	Температура внешней теплоотдающей поверхности теплоносителя T_{en} , К										
		z=0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,044-0,4	9	1000	970	950	925	900	880	870	850	835	820	800
5	114	1000	970	950	920	900	880	870	850	835	820	810
20	455	1000	980	960	930	910	890	870	860	840	830	815
	одномерная модель	1000	970	950	925	900	880	870	850	835	820	810
	наши расчёты T_f при $N_x=9$	1000	980	957	939	921	905	890	876	863	850	838

Примечание: Оптическая толщина принималась равной $\tau = \int_0^l \sigma n dl$, где l – характерный размер капельной среды, $l=l_x$; σ – сумма сечений поглощения σ_a и рассеяния σ_s ; n – концентрация капель в пелене.

Получено практически полное совпадение результатов расчётов. При большой оптической толщине результаты расчётов температуры теплоносителя не совпадают. Расхождение составляет 2-16%.

Таким образом, предложенная струйная модель теплообмена

теплоносителя КХИ и космического пространства практически идентична по полученным результатам с математической моделью [12]. Однако она обладает большей наглядностью и простотой.

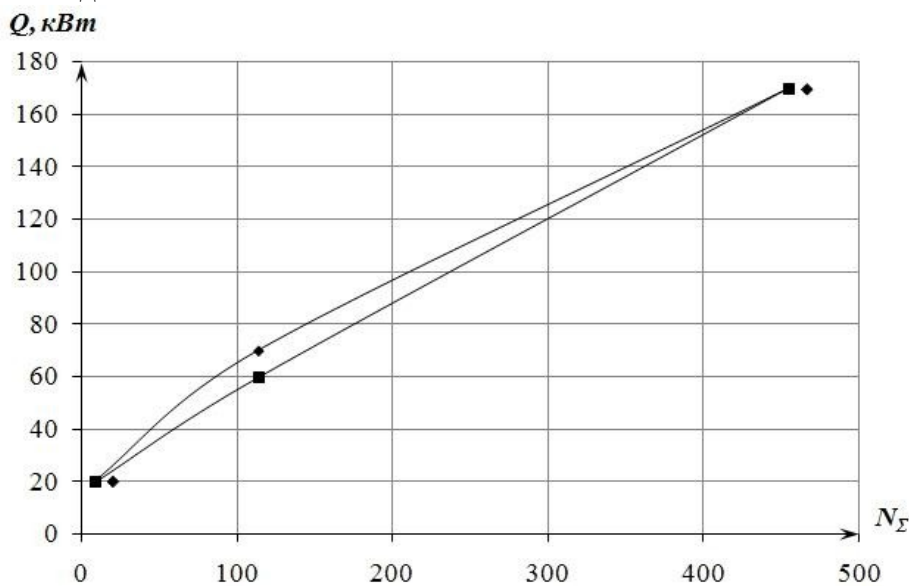


Рисунок 6 - Зависимость количества сбрасываемого тепла от числа струек КХИ, Вт
 ◆ – математическая модель [12]
 ■ – струйная модель

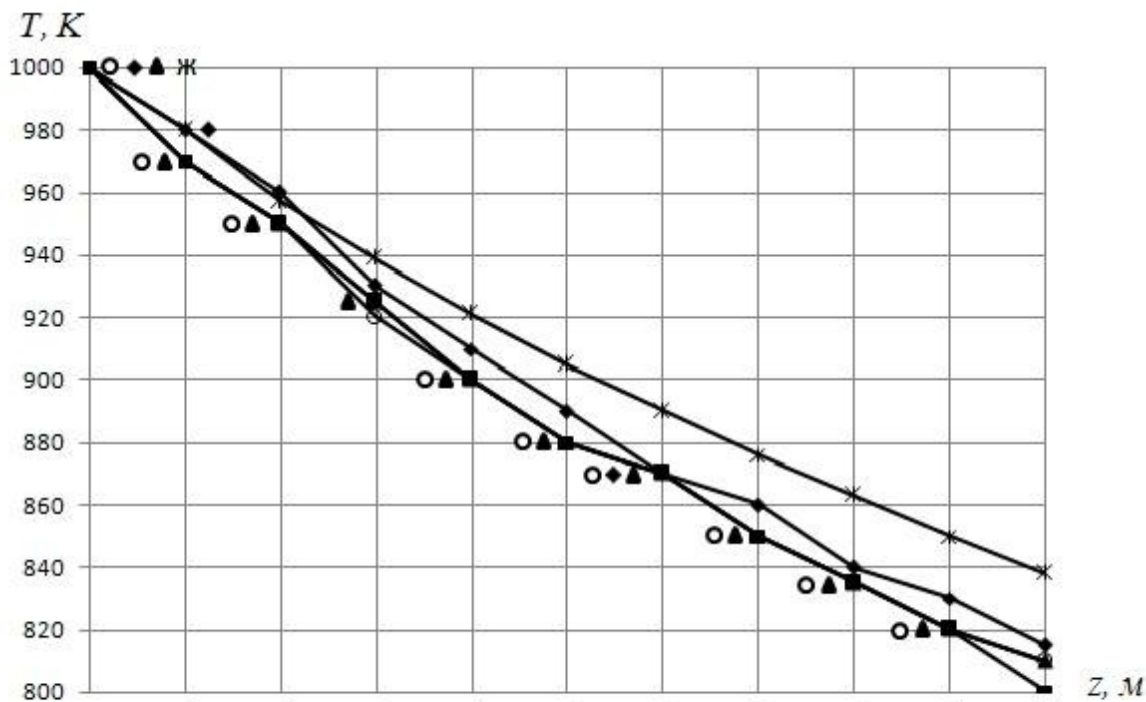


Рисунок 7 - Значения температур теплоносителя по длине пелены КХИ

- - число струек 9
- - число струек 114
- ◆ - число струек 455
- ▲ - одномерная модель
- ✱ - струйная модель (число струек 9)

Библиографический список

1. Mattick, A.T. The liquid droplet radiator an ultra light weight heat rejection system for efficient energy conversion in space / A.T. Mattick, A. Hertzberg // Acta-Astronaut. – 1982, 9. – №3. – P. 165-172.

2. Taussig, R.T. Droplet radiator systems for spacecraft thermal control / R.T. Taussig, A.T Mattick // AJAA Par. – 1984. – №1797. – 10 pp.

3. Taussig, R.T. Droplet radiator systems for spacecraft thermal control / R.T. Taussig // Journal of spacecraft and rockets. – 1986. – №1. – P. 10-17.

4. Мюнц, Э.П. Поведение жидких струй в космическом пространстве, управление ими и их применение для решения практических задач / Э.П. Мюнц, М. Ормэ // Аэрокосмическая техника. – 1987. – №11. – С. 129-142.

5. Конопка, У. Испытания жидкостного коллектора пассивного

действия излучателя капельного типа / У. Конопка, В. Сэлиа, Р. Браун // Всесоюзный центр переводов научно-технической литературы, перевод № Н-37440. – 1987. – 22 с.

6. Мэттик, А.Т. Использование капельно-жидкостных радиаторов для отвода тепла в космическом пространстве / А.Т. Мэттик, А. Герцберг // Всесоюзный центр переводов научно-технической литературы, перевод № Н-37444. – 1987. – 26 с.

7. Уайт, А. Маленькие отверстия сулят большую экономию для космических радиаторов / А. Уайт // Аэрокосмическая техника. – 1990. – №6. – С. 183-187.

8. Отчёт 353П-000-16210-102. Тема НИР «Фозт-БН». Хоздоговор №33/90. Проведение информационно-патентных исследований по проблеме создания высокоэффективных холодильников-излучателей / Центральное

специализированное конструкторское бюро - Институт ядерной энергетики АН БССР ; Утвердили Сорокин В.Н., Фомин Г.Е. ; разработчики Николаева [и др.]. – 1990. –113 с.

9. **Конюхов, Г.В.** Моделирование процессов радиационного теплообмена и массопереноса в теплообменных устройствах космического назначения на основе капельных потоков / Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев, В.В. Новомлинский, Б.Н. Баушев // Инженерно-физический журнал. – 1998. – Том 71, №1. – С. 92–96.

10. **Конюхов, Г.В.** Аналитические методы расчета радиационного охлаждения капельных потоков в условиях микрогравитации и глубокого вакуума / Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев // IV Минский международный форум ММФ-2000. Тепломассообмен в энергетических установках. – т. 10.– 2000. – 11 с.

11. **Конюхов, Г.В.** Капельные холодильники-излучатели космических энергетических установок нового поколения / Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев // IV Минский международный форум ММФ-2000. Тепломассообмен в

энергетических установках. – т. 10.– 2000. – 11 с.

12. **Конюхов, Г.В.** Капельный холодильник-излучатель для космических энергетических установок / Г.В. Конюхов, Б.Н. Баушев, А.А. Коротеев, А.И. Петров // IV Минский международный форум ММФ-2000. Тепломассообмен в энергетических установках. – т. 10.– 2000. – 11 с.

13. **Конюхов, Г.В.** Исследование рабочего процесса в капельном холодильнике-излучателе в условиях микрогравитации и глубокого вакуума / Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев, В.Н. Полуэктов // Полёт. – 2001. – №4. –С. 26-32.

14. **Конюхов, Г.В.** Перспективные системы отвода тепла для космических энергетических установок / Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев // Известия РАН, энергетика. – 2004. – №5. – С. 58-72.

15. **Кутателадзе, С.С.** Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский // М.-Л.: Госэнергоиздат. – 1959. – 414 с.

16. **Бронштейн, И.Н.** Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев //М.-Л.: Гостехиздат. – 1952. – 608 с.

References

1. **Mattick, A.T.** The liquid droplet radiator an ultra light weight heat rejection system for efficient energy conversion in space / A.T. Mattick, A. Hertzberg // Acta-Astronaut. - 1982 9. - № 3. - P. 165-172.

2. **Taussig, R.T.** Droplet radiator systems for spacecraft thermal control / R.T. Taussig, A.T Mattick // AJAA Par. - 1984. - № 1797. - 10 pp.

3. **Taussig, R.T.** Droplet radiator systems for spacecraft thermal control / R.T. Taussig // Journal of spacecraft and rockets. - 1986. - № 1. - P. 10-17.

4. **Myunts, E.P.** The behavior of liquid jets in outer space, management and their application to solve practical problems / E.P. Myunts, M. Orme // Aerospace Engineering. - 1987. - № 11. - S. 129-142.

5. **Konopka, U.** Tests liquid reservoir passive action type of drip emitter / U. Konopka, B. Selia, R. Browne // All-Union center of translations of scientific and technical literature, the translation of number N-37440. - 1987. - 22 pp.

6. **Mettik, A.T.** Using a dropping-liquid radiator to remove heat in outer space / A.T. Mettik, A. Gertsberg // All-Union center of translations of scientific and technical literature, the translation of number N-37444. - 1987. - 26 pp.

7. **Whyte, A.** Small holes offer great savings for space radiators / A. White // Aerospace Engineering. - 1990. - № 6. - S. 183-187.

8. Report 353P-000-16210-102. Research Topic «PFEE-BN». Hozdogovor № 33/90. The holding of patent studies on the creation of highly efficient refrigerators,

radiators / central specialized design bureau - Institute of Nuclear Energy of the Academy of Sciences of the BSSR Approved Sorokin VN, Fomin, GE ; Developers Nikolayeva [and others]. -1990. -113 Pp.

9. **Konyukhov, G.V.** Modeling of radiative heat transfer and mass transfer in heat exchange devices space designation on the basis of droplet flow / G.V. Konyukhov, A.A. Koroteev, V.V. Novomlinsky, B.N. Bausch // Engineering Journal of Physics. - 1998. - Volume 71, № 1. - S. 92-96.

10. **Konyukhov, G.V.** Analytical methods of calculating the radiative cooling droplet streams under microgravity conditions of deep vacuum and / G.V. Konyukhov, A.A. Koroteev // IV Minsk International Forum MMD-2000. Heat-mass exchange of power plants. - T. 10. - 2000. - 11 pp.

11. **Konyukhov, G.V.** Drip emitters refrigerators space power plants of new generation / GV Konyukhov, A.A. Koroteev // IV Minsk International Forum

MMD-2000. Heat-mass exchange of power plants. - T. 10. - 2000. - 11 pp.

12. **Konyukhov, G.V.** Refrigerator drip emitter power plants for space / GV Konyukhov, B.N. Bausch, A.A. Koroteev, A.I. Petrov // IV Minsk International Forum MMD-2000. Heat-mass exchange of power plants. - T. 10. - 2000. - 11 pp.

13. **Konyukhov, G.V.** Investigation of the working process in the refrigerator drip emitters in microgravity conditions of deep vacuum and / G.V. Konyukhov, A.A. Koroteev, V.N. Poluektov // Flight. - 2001. - № 4. -P. 26-32.

14. **Konyukhov, G.V.** Prospective heat system for space power systems / G.V. Konyukhov, A.A. Koroteev // Izvestiya RAN, energy. - 2004. - № 5. - S. 58-72.

15. **Kutateladze, S.S.** Handbook of Heat Transfer / SS Kutateladze, VM Borishansky // М.-Л.: Gosenergoizdat. - 1959. - 414 pp.

16. **Bronstein, I.** Handbook of mathematics / I. Bronstein, K.A. Cemendaev // М.-Л.: Gostehizdat. - 1952. - 608 pp.

INKJET HEAT TRANSFER WORKING MODEL PHONE (FUEL TRANSPORTATION) REFRIGERATOR DRIP EMITTERS PROSPECTIVE SPACECRAFT

© 2010 S.S. Raube, E.K. Krasnochub, V.M. Bronstein

FSUE SRPSRC "TsSKB-Progress", Samara

Using the scheme of radiant heat transfer between the unbounded plane and rows of tubes in parallel planes, considered heat transfer inkjet linen cloths coolant moving in the longitudinal direction of die refrigerator drip emitters and ending in space. A design scheme of temperature changes during cooling jet linen cloths in space. We calculated the formula for determining the current and the average temperature along the length of linen cloths, as well as the length of linen cloths depending on the heat load from the Erase spacecraft. Using the proposed simple model of heat transfer inkjet linen cloths refrigerator drip emitters and space led to the practical coincidence of our calculations the number of drop of heat into outer space droplets refrigerator and the average temperature along the length of the jet with the results obtained using a complex model of heat transfer drop linen cloths Konyukhov G.V.

Drip refrigerator-radiator, radiator, the system will provide heat treatment Thermostating, heat transfer

Информация об авторах

Раубе Сергей Станиславович, начальник группы, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», csdb@samtel.ru. Область научных интересов: проектирование ракетно-космической техники.

Красночуб Евгений Карпович, инженер-конструктор, доктор технических наук, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», csdb@samtel.ru. Область научных интересов: проектирование ракетно-космической техники.

Бронштейн Виталий Михайлович, начальник группы, кандидат технических наук, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», csdb@samtel.ru. Область научных интересов: проектирование ракетно-космической техники.

Raube Sergei S., Head of Unit, Federal State Unitary Enterprise «GNPRKTS« TSSKB Progress », csdb@samtel.ru. Research interests: design of rocket and space technology.

Krasnochub Eugene Karpovich, design engineer, doctor of technical sciences, FSUE «GNPRKTS« TSSKB Progress », csdb@samtel.ru. Research interests: design of rocket and space technology.

Bronstein Vitaly Mikhailovich, Head of Unit, Ph.D., FSUE «GNPRKTS« TSSKB Progress », csdb@samtel.ru. Research interests: design of rocket and space technology.