

УДК 62-714.1

## **СТРУЙНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА РАБОЧИХ ТЕЛ (ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ) КАПЕЛЬНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ-ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

©2009 С. С. Раубе, Е. К. Красночуб, В. М. Бронштейн

Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

Используя схему 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 расчетная схема изменения температуры при охлаждении струйной пелены в космосе. Приведены расчетные формулы для определения текущей и средней температур теплоносителя по длине пелены, а также длина пелены в зависимости от тепловой нагрузки от СОТР КА. Использование предложенной простейшей модели теплообмена струйной пелены капельного холодильника-излучателя и космического пространства привело к практическому совпадению наших результатов расчетов количества сбрасываемого тепла в космическое пространство капельным холодильником и средней температуры по длине струи с результатами, полученными с использованием сложной модели теплообмена капельной пелены Конюхова Г.В.

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

**Постановка задачи.** В работе предлагается математическая модель теплообмена для расчета 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 энерговооруженности КА, предназначенных не только для исследования дальнего космоса, но и аппаратов, эксплуатирующихся на околоземных орбитах и выполняющих задачи мониторинга, связи, навигации и др. 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. Для сброса тепла от КА в настоящее время используются панели с жидкостными каналами или с тепловыми трубами. С увеличением мощности их масса составляет все

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 осуществляется методом вынужденного капиллярного распада в генераторе капель. Распад инициируется возмущениями, источником которых могут являться, например, колебания пьезоэлемента, соединенного с генератором звуковой частоты.

Выбор рабочего тела (теплоносителя) капельного холодильника-излучателя зависит от температурного режима и давления насыщения. 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. Самым влиятельным фактором, оказывающим воздействие на конструирование КХИ, является потеря массы в процессе испарения теплоносителя.

Капельные радиаторы могут применяться в широком диапазоне прикладных задач: отвод тепла в высокотемпературных тепловых двигателях, охлаждение фотоэле-

ментов, отвод тепла от рефрижераторов, в которых температуры отвода тепла находятся в диапазоне 250-350 К. В дальнейшем мы будем рассматривать 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).

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;

- радиаторы КХИ могут длительное время находиться в условиях требуемых температур, и они имеют минимальные потери от испарения.

В основе расчетов капельного слоя принимаются следующие допущения:

- потери рабочего тепла происходят, главным образом, за счет 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 рис. 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 (СОТР) и специфики полета КА.

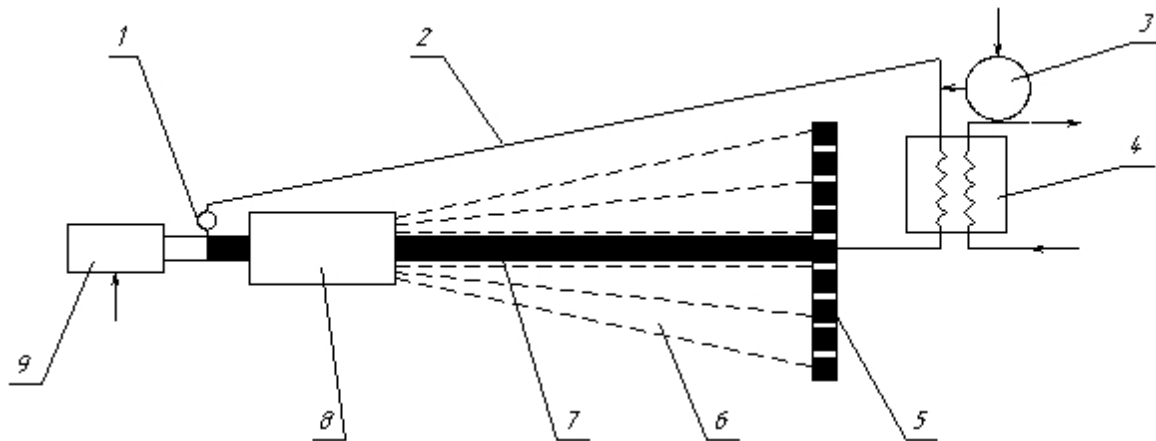


Рис. 1. Принципиальная схема устройства капельного холодильника-излучателя:

1 – гидравлический насос; 2 – сливной трубопровод; 3 – подпитывающее устройство с запасом рабочей жидкости; 4 – жидкостно-жидкостный теплообменник; 5 – генератор многодисперсных 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 в 2 раза превышает радиус сопла. Общее количество отверстий находится в прямой зависимости от следующих параметров КХИ: излучаемой мощности, массового расхода потока теплоносителя, размера капли, температуры и свойств материала капли. Расход потока через каждое сопло можно определить с помощью давления жидкости, плотности и параметров отверстий.

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

Под действием давления рабочая жидкость из каждого отверстия генератора капле 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 ее распад. Все образованные таким образом капли имеют одинаковую скорость в диапазоне 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].

Впервые сведения о КХИ появились в американской печати в 80-х годах [1-7]. В 80-90 гг. (1988-1993 гг.) ЦСКБ совместно с кооперацией (в частности, Институт ядерной энергетики АН БССР, Московский энергетический институт) согласно решению директивных органов должна быть проведена НИР «ФозТ-БН». Предполагалось провести исследования проблем отвода большого количества тепла в космическое пространство для создания малогабаритных высокоэффективных излучателей перспективных КА. Внедрение результатов НИР должно быть в ЦСКБ. Однако в силу известных обстоятельств были проведены только информационные исследования по проблеме создания высокоэффективных излучателей, включая КХИ. Были проанализированы работы, в основном содержащиеся в списке литературы данной статьи на то время [8].

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 скоро-

стью монодисперсных сферических капель, имеющих определенную концентрацию в пелене и радиус. Пелена разбивалась на определенные ячейки. Капли излучают по закону Стефана-Больцмана. Интенсивность излучения определяется законом Планка. Использовано предположение о монохроматическом характере излучения капель. Считалось, что энергия излучается ячейкой 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 расчеты по определению температурных и энергетических характеристик капельной пелены теплоносителя КХИ.

**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.

Математическую 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 (рис. 2) [15].

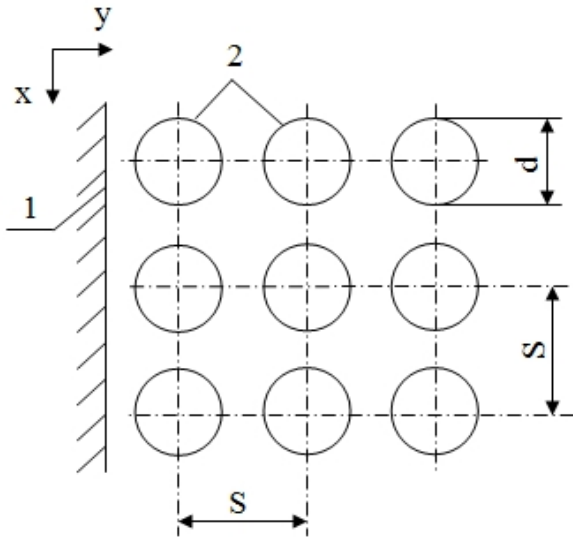


Рис. 2. Схема взаимных поверхностей для расчёта коэффициентов облученности

Угловой коэффициент системы  $\varphi_{12}$  для  $n$  рядов труб равен:

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

Здесь  $\varphi'_{12}$  - угловой коэффициент для одного ряда труб:

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

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  $T_1, \varepsilon_1$ , температура и степень черноты поверхности труб  $T_2$  и  $\varepsilon_2$ . 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  $AA_1BC$  (рис. 3), для расчета которой можно воспользоваться формулой для приведенной степени черноты  $\varepsilon_{np}$ :

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}}. \quad (3)$$

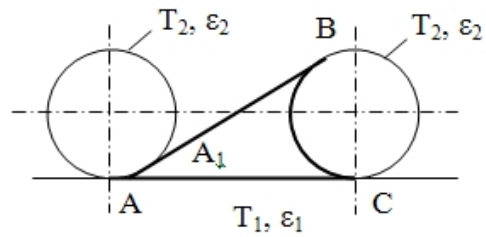


Рис. 3. К расчёту теплообмена излучением между бесконечной плоскостью и рядом труб

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

$$H_{12} = H_{21} = \varphi_{12}S = \varphi_{21}\pi d; \quad (4)$$

$$\varphi_{21} = \frac{\varphi_{12}S}{\pi d}; \quad (5)$$

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

Здесь  $\sigma_0$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma_0 = 5,6693 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$Q_{12}$  - результирующий тепловой поток на единицу длины труб между плоскостью 1 и рядом труб 2, Вт/м.

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  $S_x = S_y = S$  (рис. 4).

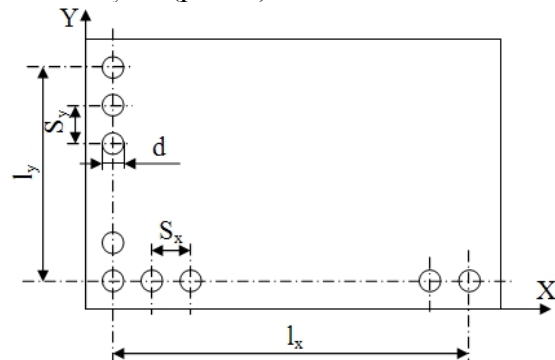


Рис. 4. Поперечное сечение струйной пелены:  $l_x, l_y$  - расчётные размеры пелены в направлении координатных осей  $X, Y$ ;  $l_x = (N_x - 1)S_x$ ;  $l_y = (N_y - 1)S_y$

Размеры пелены в направлении координатных осей  $X, Y, Z$  принимаем равными соответственно  $l_x, l_y, l_z$ . Температура струй на выходе из струйного генератора  $T_1$ , тем-

пература струй на входе в гидросборник  $T_2$ , текущая температура струи  $T_f = T_f(z)$ . Удельная теплоемкость жидкости  $c_p$ , коэффициенты излучения поверхности жидкой струи  $\varepsilon_2$ , струйной пелены  $\varepsilon_{np}$ . Температуру пелены на входе в гидросборник  $T_2$ , текущую температуру пелены  $T_f$  по длине  $z$ , средние температуры  $\bar{T}_f$  пелены на длине  $z$ , считая, что температура вдоль координатных осей  $X$ ,  $Y$  равны, будем определять следующим образом (рис.5).

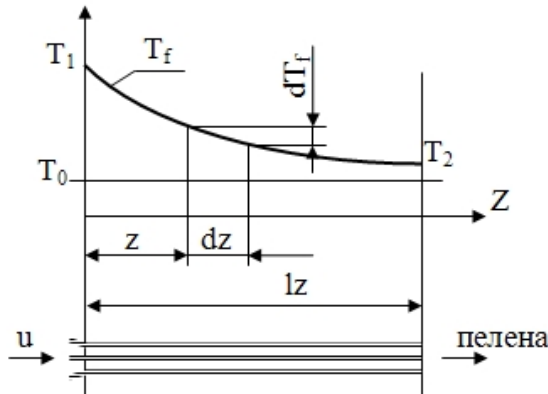


Рис. 5. Схема изменения температуры струйной пелены  $T_f$  при охлаждении её в космосе при температуре  $T_0$

В случае, когда  $l_x, l_y$  намного меньше  $l_z$ , теплообменом со стороны боковых поверхностей пелены можно пренебречь. Рассмотрим более общую задачу с учетом 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:

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

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;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>;  $\varphi_{12}$  – угловой коэффициент излучения между космическим пространством и струйной пеленой;  $S$  – расстояние между струями.

Далее:

$$-Gc_p dT_f = 2\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}(T_f^4 - T_0^4) \times [(N_x - 1) + (N_y - 1)]Sdz. \quad (8)$$

Обозначая

$$\frac{2\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}[(N_x - 1) + (N_y - 1)]S}{Gc_p} = A, \quad (9)$$

получим:

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

Разделяем переменные:

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

Интегрируем:

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

Имеем [16]:

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

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

Тогда из (12) получаем

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

$$T_f = T_1 \sqrt[3]{\frac{Gc_p}{6\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}(l_x + l_y)T_1^3 z + Gc_p}}. \quad (15)$$

Среднее значение температуры теплоносителя на длине  $z$ :

$$\bar{T}_f = \frac{1}{4\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}(l_x + l_y)T_1^2 z} \times \quad (16)$$

$$\times \sqrt[3]{Gc_p(6\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}(l_x + l_y)T_1^3 z + Gc_p)}.$$

Из выражения для  $T_f$  (15) получаем длину пелены:

$$z = \frac{Gc_p(T_1^3 - T_f^3)}{6\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}(l_x + l_y)T_1^3 T_f^3}. \quad (17)$$

Излучающая площадь пелены будет 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:

$$Q = \frac{3\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}T_f^3T_1^3}{T_1^2 + T_1T_f + T_f^2}; \quad (20)$$

$$z = \frac{Q(T_1^2 + T_1T_f + T_f^2)}{6\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}(l_x + l_y)T_f^3T_1^3}. \quad (21)$$

Сброс тепла с единицы площади пелены КХИ:

$$\frac{Q}{F} = \frac{3\varepsilon_{np}\sigma_0\varphi_{12}T_1^3T_f^3}{T_1^2 + T_1T_f + T_f^2}. \quad (22)$$

Сравним результаты расчетов по выведенным нами формулам и результатами Конюхова Г.В. с соавторами [12] в соответствии с исходными данными (табл.1).

Таблица 1 – Исходные данные Конюхова Г.В. и соавторов [12]

Тепло-носитель	$c_p$ , Дж/кгК	$\varepsilon_2$	$d$ , 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

Определим коэффициенты  $\varepsilon_{np}$ ,  $\varphi_{12}$  для многорядного расположения струй (формулы (1), (3)):

$$\varphi_{12} = 1 - (1 - \varphi'_{12})^n,$$

где  $n$  – число струй по координате  $Y$ , то есть  $n = N_y = 51$ ;

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}}.$$

При  $\frac{S}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-3} i}{0,2 \cdot 10^{-3} i} = 10$

$\varphi'_{12} = 0,1521$  (формула (2));

$\varphi_{12} = 1$  (формула (1));

$\varphi_{21} = 3,1831$  (формула (5)).

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

$$\frac{S}{d} = \frac{\pi\varphi_{21}}{\varphi_{12}} = \frac{\pi \cdot 1}{1} = \pi.$$

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

$\frac{S}{d} = 1 \div \pi$ . В противном случае, при  $\frac{S}{d} > \pi$  необходимо принимать  $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$ .

Тогда

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \cdot 1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \varepsilon_2.$$

То есть  $\varepsilon_{np} = \varepsilon_2$ .

Расчеты температуры на входе в гидросборник КХИ  $T_2$ , средней температуры на длине пелены ( $z = 10$  м)  $\bar{T}_f$ , теплового потока, сбрасываемого теплоносителем КХИ на длине пелены общей площадью излучения  $F$  в космическое пространство  $Q$ , средней температуры на 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 табл.2.

Таблица 2 – Результаты расчётов параметров теплоносителя КХИ по исходным данным Конюхова Г.В. с соавторами

$N_x$	$T_2$ , К	$\bar{T}_f$ , К	$Q$ , кВт	$F$ , м <sup>2</sup>	$\frac{Q}{F}$ , кВт/м <sup>2</sup>	$\frac{T_1 + T_2}{2}$ , 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 вы-

ходе из генератора не должна быть меньше температуры:

$$T_1 \geq T_f \sqrt[3]{\frac{Gc_p}{Gc_p - 6\epsilon_{np}\sigma_0\phi_{12}(l_x + l_y)T_f^3 z}}$$

Температура теплоносителя (жидкое олово) по длине пелены  $z = 0 \dots 10$  м в зависимости от числа струек  $N_x$  приведена в табл. 3. Сравнение результатов наших расчетов и расчетов Конюхова Г.В. с соавторами [12] приведено в табл. 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 рис. 6, 7. Здесь же нанесены аналогичные зависимости, полученные Конюховым Г.В. с соавторами [12].

Таблица 3 – Результаты расчётов 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	975,8	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 Конюхова Г.В. с соавторами (рис. 3,а, 5 [12])

Оптическая толщина, $\tau$	Число струек, $N_x$	Температура внешней теплоотдающей поверхности теплоносителя $T_{сн}$ , 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,  $l=l_x$ ;  $\sigma$  – сумма сечений поглощения  $\sigma_a$  и рассеяния  $\sigma_s$ ;  $n$  – концентрация капель в пелене.

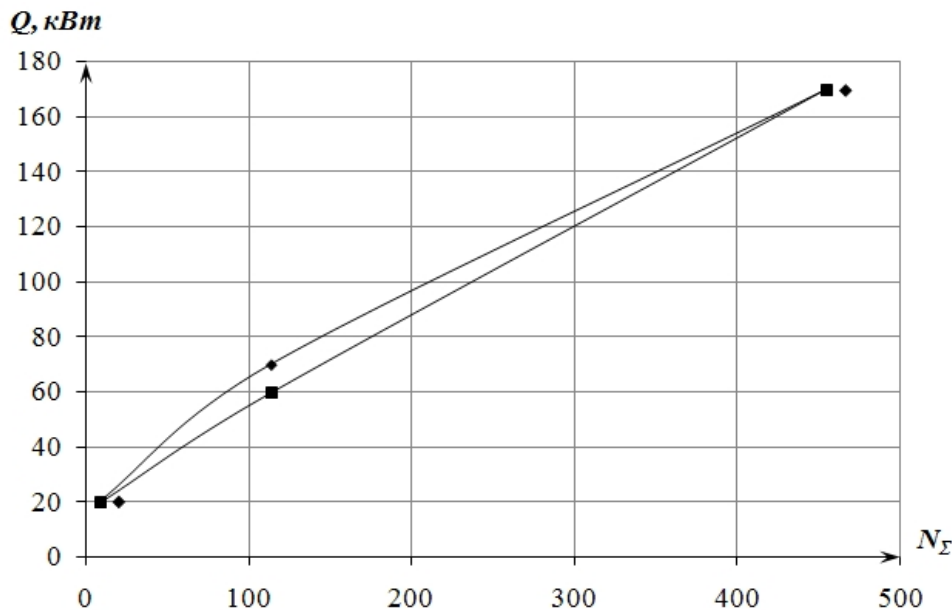


Рис. 6. Зависимость количества сбрасываемого тепла от числа струек КХИ, Вт:

- ◆— - математическая модель Конюхова Г.В. [12];
- - струйная модель



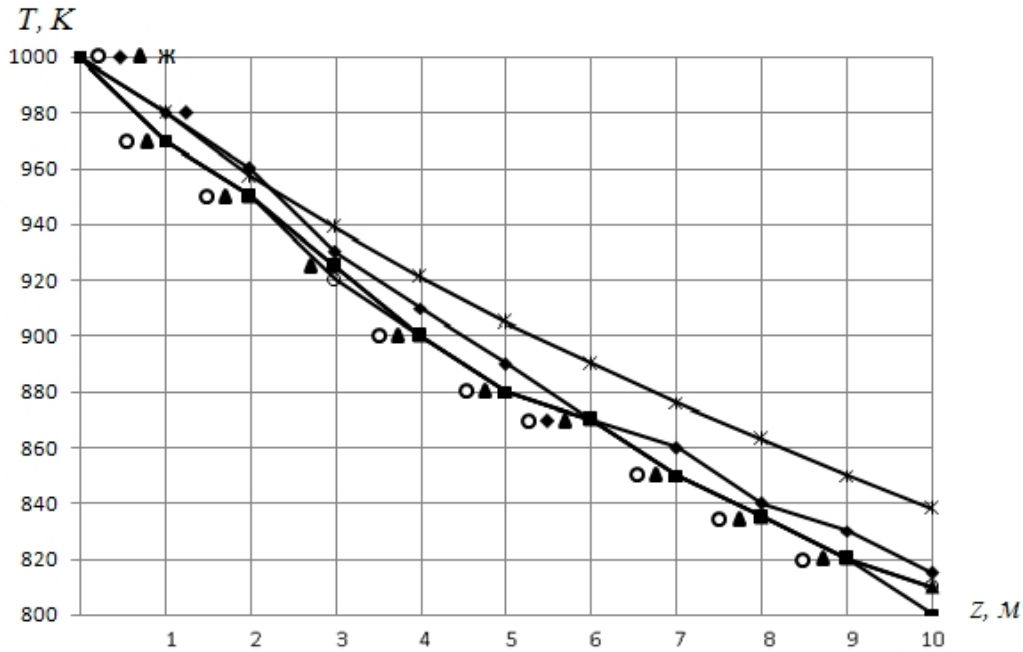


Рис. 7. Значения температуры теплоносителя по длине пелены КХИ:

—■— - число струек 9; —○— - число струек 114; —◆— - число струек 455;  
 —▲— - одномерная модель; —×— - струйная модель (число струек 9)

Получено практически полное совпадение результатов наших расчетов и Конюхова Г.В. При большой оптической толщине результаты расчетов температуры теплоносителя не совпадают. Расхождение составляет 2...16%.

Таким образом, предложенная нами струйная модель теплообмена теплоносителя КХИ и космического пространства практически идентична по полученным результатам с математической моделью Конюхова Г.В. с соавторами. Однако она обладает большей наглядностью, простотой и оперативностью.

### 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 практи-

ческих 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 // Всесоюз. центр переводов науч.-техн. лит., пер. № 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 науч.-техн. лит., пер. № 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 / ЦСКБ - Институт ядерной энергетики АН БССР ; утв. Сорокин В.Н., Фомин Г.Е. ; разраб. 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 [и др.]// Инженерно-физический журнал. – 1998. – Т. 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 [и др.]// 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. Боршанский // 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. Mattick, A.T. Using a dropping-liquid radiator to remove heat in outer space / A.T. Mattick, 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. Korotееv, 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. Korotееv // 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. Korotееv // 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. Korotееv, A.I. Petrov // IV

Minsk International Forum MMD-2000. Heat-mass exchange of power plants. - Т. 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. Konyuk-

hov, 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. Semendyaev // М.-Л.: Gostehizdat. - 1952. - 608 pp.

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

©2009 S. S. Raube, E. K. Krasnochub, V. M. Bronstein

FSUE SRPSRC "TsSKB-Progress"

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 Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: [csdb@samtel.ru](mailto:csdb@samtel.ru). Область научных интересов: проектирование ракетно-космической техники.

**Красночуб Евгений Карпович**, доктор технических наук, инженер-конструктор Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: [csdb@samtel.ru](mailto:csdb@samtel.ru). Область научных интересов: проектирование ракетно-космической техники.

**Бронштейн Виталий Михайлович**, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: [csdb@samtel.ru](mailto:csdb@samtel.ru). Область научных интересов: проектирование ракетно-космической техники.

**Raube Sergei Stanislavovich**, Head of Unit of Federal State Unitary Enterprise «TSSKB-Progress». E-mail: [csdb@samtel.ru](mailto:csdb@samtel.ru). Area of Research: design of rocket and space technology.

**Krasnochub Eugene Karpovich**, doctor of technical sciences, design engineer of Federal State Unitary Enterprise «TSSKB- Progress». E-mail: [csdb@samtel.ru](mailto:csdb@samtel.ru). Area of Research: design of rocket and space technology.

**Bronstein Vitaly Mikhailovich**, Candidate of technical sciences, a leading design engineer of Federal State Unitary Enterprise «TSSKB- Progress». E-mail: [csdb@samtel.ru](mailto:csdb@samtel.ru). Area of Research: design of rocket and space technology.