



## СИСТЕМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.78.064.56.048.7

### 7. ЖИДКОСТНО-КАПЕЛЬНЫЙ ХОЛОДИЛЬНИК-ИЗЛУЧАТЕЛЬ - СИСТЕМА ТЕПЛОСБРОСА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В КОСМОСЕ

The liquid droplet radiator - an ultralightweight heat rejection system for efficient energy conversion in space. Mattick A.T., Hertzberg A. "Acta Astronaut.", 1982, № 3, 165-172.

Предлагается новая конструкция холодильника-излучателя, в которой вместо излучающих, твердых поверхностей предполагается использовать струи, состоящие из капель жидкости. Основным преимуществом такой излучающей системы является ее малая масса, которая в несколько раз меньше массы самой легкой конструкции излучающего поля, состоящего из тепловых труб. Это связано как с отсутствием разграничивающих рабочее тело и окружающее пространство твердых стенок, так и со снятием проблемы метеоритной опасности.

Основной идеей предполагаемого устройства является создание больших излучающих поверхностей в виде плоских капельных струй, характеризующихся малой удельной массой на единицу излучающей поверхности).

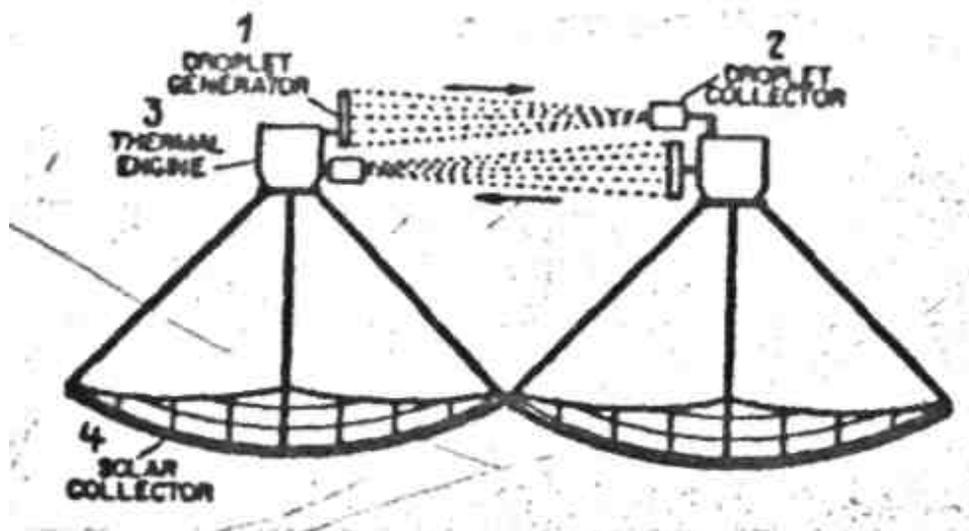


Рис.1

Этот параметр легко определить по формуле  $\rho r/3$  где  $\rho$  – плотность жидкости, а  $r$  - радиус капли. При радиусе капли менее 100 мкм удельная масса собственно излучателя много меньше самого совершенного излучателя на тепловых трубах, для которого характерное значение удельной массы составляет 5-10 кг/м<sup>2</sup>. Это положение имеет место даже в случае использования в качестве излучающих частиц капель, тяжелых металлов с низкой излучательной способностью, применение которых целесообразно при высоких температурах, главным образом в связи с низкой скоростью испарения.

Схема солнечной тепловой энергоустановки с жидкостно-капельным излучателем показана на рис.1, где: 1 - генератор капель; 2- сборник капель; 3 - тепловой двигатель; 4 - коллектор солнечного излучения.

Применение парных модулей обеспечивает исключение на конструкции трубопроводов, возвращающих охлажденную рабочую жидкость, а суживающаяся форма излучающей поверхности уменьшает размеры сборника капель и повышает эффективность теплосброса. Приведенная на рис.1 конструктивная схема излучателя, вообще говоря, не является оптимальной; возможно применение излучателей с другими формами излучающей поверхности.

Конструктивные схемы генератора и сборника капель показаны на рис.2, где **a** - генератор капель; **b** - сборник капель; 1 - вибратор; 2 - сопло; 3 - насос; 4 - к тепловому двигателю; 5 - главный насос; 6 - вращающееся уплотнение; 7 - поток капель.

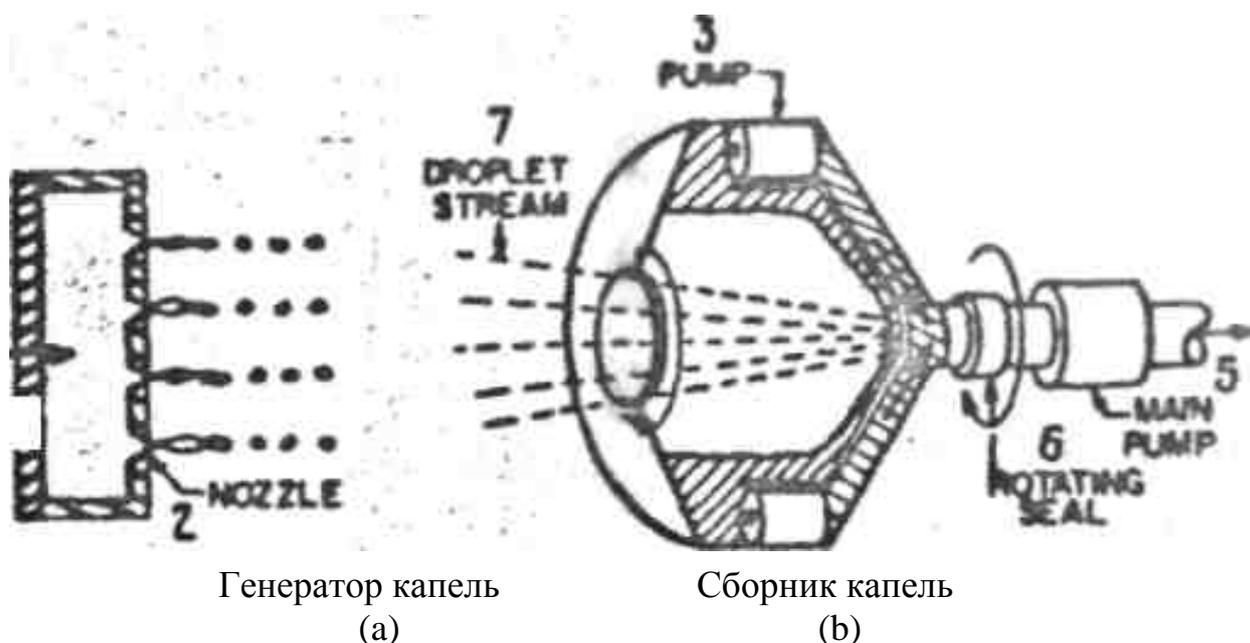


Рис.2

Генератор капель представляет собой полу ю емкость, одна из стенок которой оснащена отверстиями с соплами, а противоположная является вибратором. Генератор при частоте вибратора  $10^5$  Гц обеспечивает равномерный поток мелких капель размером менее 50 мкм и используется в технике струйной печати [3]. Возможность распыления таким же образом жидких металлов по исследованиям Вашингтонского университета по существу ограничена чисто проблемами, связанными с подбором конструкционных материалов для генератора капель жидких металлов, работающего при высоких температурах.

Основной функцией сборника капель является улавливание струи и перевод капель в сплошную жидкость для переноса ее к теплообменнику. В соответствии с рис. 2, **b** эта функция может осуществляться закрутки сборника вокруг продольной оси симметрии и размещения насосов на некотором расстоянии от оси вращения. Принцип действия схемы отработан в технологии очистки металлов для условий космического производства [4].

**Параметры излучателя.** Для определения массы излучателя необходимо знать телесный угол излучения одиночной капли в струе и характерную излучательную способность жидкости,  $\epsilon_0$ . Плотное облако капель удобнее характеризовать значением оптической толщины  $r = n \sigma S$  и полусферической излучательной способностью плоской струи  $\epsilon$ , где  $n$  - плотность числа капель,  $\sigma = \pi r^2$  - поперечное сечение капли,  $S$  - толщина плоской струи. При указанном определении оптической толщины нормальное излучение плоской струи капель равно  $\epsilon^r$ . Выбор величины  $r$  для конкретных условий работы излучателя связан с нахождением компромиссного решения между вариантами с малой массой (при малых значениях  $r$ ) и малой площадью излучающей поверхности (при больших  $r$  и больших  $\epsilon$ ).

Капельно-жидкостный излучатель целесообразно охарактеризовать относительной массой и относительной площадью поверхности. Относительная масса представляет собой отношение массы излучателя при некоторых конкретных значениях  $\epsilon_0$  и  $r$  к минимально возможной массе (отдельно летящие черные капли, т.е.,  $\epsilon_0 = 1, r \rightarrow 0$ ). Относительная площадь - отношение площади поверхности излучателя при данных  $\epsilon_0$  и  $r$  к площади поверхности непрозрачного абсолютно черного излучателя ( $\epsilon_0 = 1$ ).

При относительно больших значениях излучательной способности ( $\epsilon_0 \geq 0,5$ ) приемлемое сочетание относительных значений массы и площади имеет место при оптической толщине  $r \leq 1$ . При малых значениях  $\epsilon_0$  ( $\epsilon_0 \leq 0,2$ ), характерных для жидкометаллических капель, целесообразно иметь большие значения оптической толщины ( $r = 1 \div 3$ ). Физически это можно объяснить тем обстоятельством, что при малых значениях излучательной способности энергия излучения капли в значительной мере переотражается соседними каплями. При малых  $\epsilon_0$  и больших  $r$ . эффективная излучательная способность струи  $\epsilon$  может быть в несколько раз больше величины  $\epsilon_0$  [2]

Для излучателя с каплями олова при температурах 600-1000°K ( $\epsilon_0 = 0,1$ ) выбор  $r = 2,5$  приводит к значениям относительной массы и относительной площади 14,5 и  $\sim 3$ , соответственно. При этих значениях относительных параметров капельно-жидкостной излучающий элемент со средним диаметром капель 100 мкм примерно в 3-6 раз легче самого эффективного излучателя с твердыми излучающими поверхностями. Кроме того, возможно, совершенствование за счет уменьшения диаметра капель.

Важным средством улучшения массогабаритных параметров излучателя является повышение излучательной способности капель теплоносителя,  $\epsilon_0$ . Увеличение  $\epsilon_0$  возможно как путем введения в теплоноситель твердых добавок, обладающих высокой излучательной способностью, так и за счет использования в качестве теплоносителя сплавов легкоплавких металлов [5]. Менее очевидным способом повышения эффективной излучательной способности является использование капель, диаметр которых сопоставим с длиной волны излучения  $\lambda$ . Расчетные исследования рассеяния на облаке капель показывают, например, что при  $\lambda = \pi D/10$  значению  $\epsilon_0 = 0,1$  соответствует эффективное  $\epsilon = 0,2$ , значению  $\epsilon_0 = 0,5$  -  $\epsilon = 0,75$ . Этот резонансный эффект удобнее использовать при относительно небольших температурах излучения, при которых  $\lambda \gg 10$  мкм. В противном случае необходимо генерировать капли очень малого размера.

Температура излучающей капли в полете уменьшается, однако для упрощения расчетов массогабаритных характеристик целесообразно использовать некоторую эффективную температуру излучения  $T_e$ . Тогда удельная массовая мощность  $Q/M$ , представляющая собой отношение излучаемой мощности к массе излучателя, можно записать в виде [2]:

$$Q/M = \sigma T_e^4 / \rho_d \langle m^* \rangle, \quad (1)$$

где  $T_c^* = 3T_0^4 / (f^3 + f^2 + f)$ ,  $f = T_0 / T_1$ .

$T_0$  и  $T_1$  - начальная и конечная температуры капли в процессе излучения;  $\rho_r = \rho r / 3$ , а  $\langle m^* \rangle$  - среднее значение относительной массы плоской струи излучающих капель.

**Материалы излучателя.** В качестве теплоносителей целесообразно использовать вещества с низким давлением насыщенных паров и высокой теплопроводностью. В работе [2] показано, что для обеспечения пренебрежимо малых потерь теплоносителя за счет испарения при 30-летнем сроке эксплуатации необходимо, чтобы давление его насыщенных паров при температуре  $T_1$  не превышало  $1,3 \cdot 10^{-5}$  Па.

Этим требованиям удовлетворяют некоторые жидкие металлы, в частности, олово (температура плавления  $T_f = 505^\circ\text{K}$ ), галлий ( $T_f = 330^\circ\text{K}$ ) и индий ( $T_f = 429^\circ\text{K}$ ). Галлий и индий, правда, вряд ли пригодны, так как они отсутствуют в достаточных количествах. Наиболее подходящим металлом является олово, давление насыщенных паров которого составляет  $1,3 \cdot 10^{-5}$  Па при температуре  $1030^\circ\text{K}$ , что является приемлемым в диапазоне рабочих температур до  $500^\circ\text{K}$ . При более низких температурах возможно использование эвтектики свинец-олово ( $T_f = 456-670^\circ\text{K}$ ), тройной эвтектики олово-свинец-висмут ( $T_f = 369-550^\circ\text{K}$ ) и эвтектического сплава NaK ( $T_f = 261-340^\circ\text{K}$ ).

При температуре излучения порядка  $300^\circ\text{K}$  возможно использование некоторых вакуумных масел и смазок. Примерами могут служить материалы с фирменными марками Dow-705 (пентафенилтриметилтрисилоксан) и KEL-F+3 (хлоротрифторэтилен). Эти вещества являются полупрозрачными и, следовательно, характеризуются более высокой излучательной способностью, чем металлические теплоносители. Характерным значением  $\epsilon_0$  этих масел является величина - 0,9.

Одним из преимуществ рассматриваемых систем является нечувствительность их излучающих поверхностей к единичному пробоя при столкновении с микрометеоритами. Излучатели с твердыми излучающими стенками обычно оснащаются тяжелой противометеоритной защитой с целью снижения вероятности их пробоя до приемлемого уровня.

Излучатели на тепловых трубах в меньшей степени страдают от пробоя метеоритами, однако их характеристики с каждым пробоем ухудшаются, в большей степени, чем при пролете микрометеорита через излучающую струю рассматриваемого устройства.

Для оценки уноса теплоносителя в последнем случае целесообразно привлечь два возможных механизма взаимодействия микрометеорита со струей: изменение направления полета капли и испарение жидкости вследствие ее нагрева.

Оценка потерь в предположении о величине средней скорости метеорита  $20$  км/с и его плотности  $2$  г/см<sup>3</sup> показывает, что потери жидкости (олова) из-за отклонения капель соответствуют пренебрежимо малой величине (эквивалентно

вероятности столкновения капли с метеоритом  $p = 10^{-41}$ /год). Потери жидкости при возможном пролете метеоритов через струю также пренебрежимо малы и составляют  $7,4 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>2</sup> год.

Потенциальная выгода от применения жидкостно-капельного холодильника-излучателя в составе экспериментальной установки лучше всего иллюстрируется конкретными примерами установок с различными системами преобразования энергии. Ниже приведены некоторые результаты проработок таких установок, полученные в результате сравнения с данными работы по программе создания космических электростанций, выполнявшиеся фирмой Boeing Aerospace [7].

**Установка с циклом Ренкина.** Применительно к схеме солнечной космической электростанции мощностью 10 ГВт фирмой Boeing рассмотрен цикл Ренкина на калии с максимальной температурой 1242°К и минимальной - 932°К, обеспечивающий по расчетам к.п.д. 18,9%. Холодильник-излучатель станции, работающей по этому циклу, выполненный из тепловых труб, излучает 78 ГВт тепла и имеет массу 15390 т (удельная масса около 0,2 кг/кВт излучаемого тепла). Масса твердых излучающих поверхностей (тепловых труб) составляет 50% общей массы излучателя.

Была предпринята попытка оценить конструктивную схему аналогичной станции, работающей по циклу Ренкина, но с жидкостно-капельным излучателем на жидком олове. Максимальная и минимальная температур, капель составляют 932 и 532°К, соответственно. Эффективная температура излучения - 686°К. Оценка произведена для уровня мощности 1 МВт.

При диаметре капли 50 мкм, оптической глубине струи  $r = 1,5$  и излучательной способности  $\epsilon_0 = 0,2$  (повышенной с помощью одного из ранее рассмотренных методов) относительная масса составляет  $m^* = 7,5$ , эффективное значение  $\epsilon = 0,4$  и удельная масса излучающей струи 0,033 кг/кВт.

При давлении теплоносителя, в генераторе капель 1 МПа скорость движения капель в струе составляет  $v = \sqrt{(2p/\rho)} = 17,1$  м/с. При этом длина излучающей струи равна 56 м. В предположении, что полет капель происходит в пределах телесного угла 0,01 рад, входной диаметр сборника капель оценивается величиной в 1 м. Ширина генератора капель составляет 24 м, высота - 5 см, площадь излучающей струи - 696 м<sup>2</sup>, излучаемая мощность - 7 МВт. Масса генератора капель оценивается величиной 245 кг, теплообменника - 350 кг (удельная масса - 0,035 и 0,05 кг/кВт, соответственно). Удельная масса теплообменника может, быть пересчитана по результатам более ранней проработки [8]. Масса насоса, обеспечивающего расход теплоносителя 67 кг/с при перепаде давления 1 МПа и мощности 10 кВт составляет 150 кг (удельная масса 0,021 кг/кВт), Масса сборника капель при использовании электростатического или магнитогидродинамического способов сбора жидкости, может составить 300 кг (удельная масса 0,043 кг/кВт).

Таким образом, суммарная удельная масса капельно-жидкостного излучателя составляет величину 0,18 кг/кВт, т.е. почти не отличается от удельной массы более традиционного излучателя на тепловых трубах. Тем не менее, капельно-жидкостный

излучатель имеет такие важные преимущества, как практически полная нечувствительность к воздействию микрометеоритов и несравненно более высокая эффективность вывода в космическое пространство. Последнее преимущество характеризуется тем фактом, что при выводе на орбиту системы с жидкостно-капельным холодильником излучающая поверхность площадью  $700 \text{ м}^2$  по существу транспортируется в объеме  $0,034 \text{ м}^3$ .

Тот факт, что собственно излучающая поверхность имеет очень низкую удельную массу, целесообразно использовать для повышения общего к.п.д. установки путем уменьшения эффективной температуры излучения. Расчеты показывают, что при снижении температуры начала излучения капель с  $932$  до  $723^\circ\text{К}$  и при неизменной температуре капель на входе в сборник,  $T_1 = 532^\circ\text{К}$ , эффективная температура излучения составляет  $619^\circ\text{К}$ . При этом полный термодинамический к.п.д. равен  $30\%$ . В этом случае удельная масса капельно-жидкостного излучателя составляет  $0,4 \text{ кг/кВт}$  при удельной массе излучателя на тепловых трубах для тех же температурных условий  $0,53 \text{ кг/кВт}$ .

Схемы установок с циклом Ренкина в поэлементное распределение масс в общей массе показано на рис. 3, где в левой части - схема установки с излучателем на тепловых трубах, а в правой - с капельно-жидкостным излучателем, DS - излучаемая струя; К - калий; М - патрубки; ТР - обвязка трубопроводов; НР - массив тепловых труб; Р- насос; НХ - теплообменник; G- генератор капель; С- сборник капель; В- парогенератор; Т - турбина.

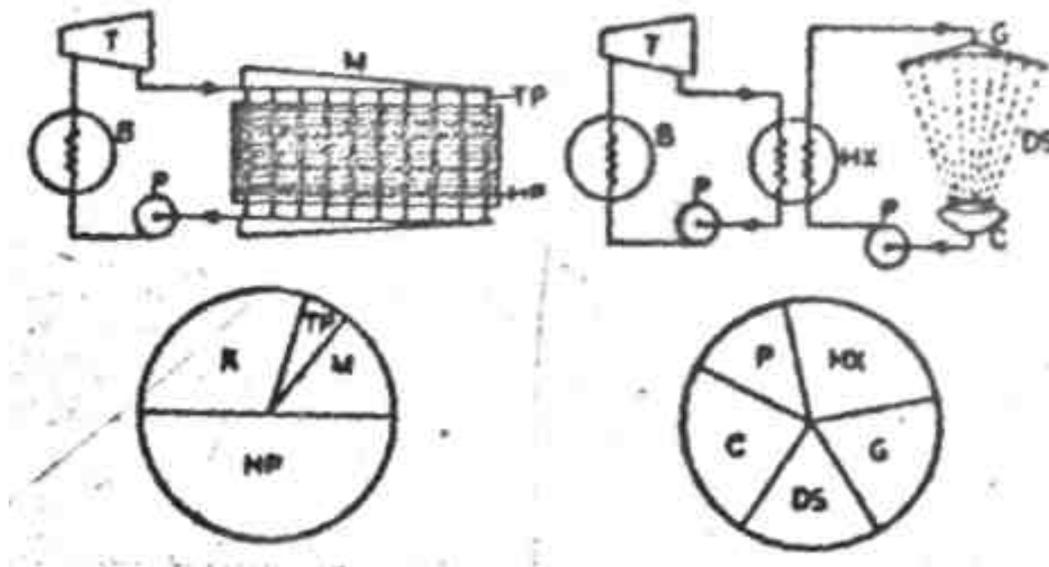


Рис. 3

**Установка с циклом Брайтона.** В ранних работах фирмы Boeing [9] рассмотрены установки с циклом Брайтона с гелием в качестве рабочего тела. Было установлено, что эти системы заметно более тяжелые, чем установки с циклом Ренкина, главным образом вследствие значительно большей удельной массы холодильника-излучателя. В состав излучателя включен теплообменник “гелий –

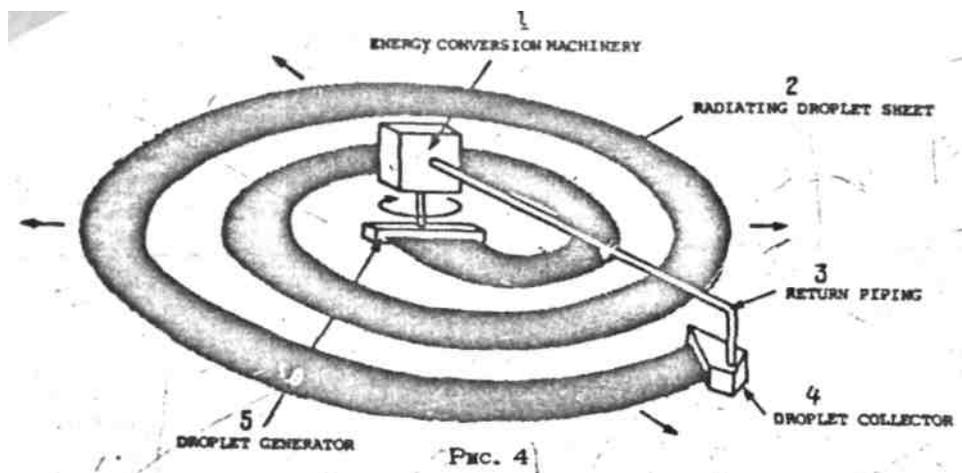
NaK” (температура гелия изменяется в пределах от 685 до 404°K, сплава NaK - от 377 до 644 °K) и тепловые трубы, нагреваемые потоком сплава NaK. Удельная масса излучателя составляет 1,4 кг/кВт, причем 70% массы составляет масса тепловых труб.

При том же температурном уровне удельная масса капельно-жидкостного излучателя составляет 0,9 кг/кВт, причем масса излучающей струи составляет всего 9% от общей массы излучателя.

**Установки на ядерной энергии.** Эти системы весьма привлекательны вследствие высокой плотности мощности, характерной для источника тепла. В частности, в [10] был произведен анализ системы, в которой используется ядерный реактор с вращающейся активной зоной засыпного типа, и было показано, что можно рассчитывать на получение плотности мощности 1000 МВт/м<sup>3</sup>.

Для этой установки, по-видимому, целесообразно использовать рассмотренный в [11] струйный излучатель вращающегося типа. Пример конструкции вращающегося капельно-жидкостного излучателя показан на рис. 4, где 1 - система преобразования энергии; 2 - вращающаяся струя капель; 3 - труба для возвращения теплоносителя в систему преобразования энергии; 4 - сборник капель; 5 - генератор капель.

Предварительный анализ показывает, что масса такого излучателя может быть в 2—4 раза меньше по сравнению с массой излучателя того же типа, но без вращения струйной излучающей поверхности.



**Фотоэлектрическая энергоустановка.** Эффективность фотоэлектрических солнечных установок можно повысить путем преобразования концентрированного солнечного излучения но при этом требуется применение принудительного охлаждения фотоэлементов. На основании данных конструктивной проработки, выполненной фирмой Boeing [7], была произведена оценка возможности использования для охлаждения фотоэлементов капельно-жидкостного излучателя с использованием в качестве теплоносителя силиконового масла ( $\epsilon_0 = 0,9$ ;  $r = 1, 50$  мкм,  $T_e = 286^\circ\text{K}$ ). В результате оценки установлено, что в этом случае удельные

массы систем с концентрацией солнечной энергии и без нее приблизительно одинаковы. Однако при использовании концентрации площадь поверхности фотобатарей резко сокращается, что должно привести к значительному снижению стоимости энергоустановки с концентрацией солнечной энергии.

Использование капельно-жидкостного холодильника-излучателя на космических аппаратах требует решения ряда побочных технических проблем. К их числу относятся: проблема загрязнения поверхности летательного аппарата парами теплоносителя и теплоносителя - газовыми компонентами от струй реактивных двигателей; проблема снятия электростатического заряда капель; необходимость ориентации излучателя; производственные проблемы при изготовлении элементов излучателя и т.п.

Проблема устранения загрязнений поверхностей аппаратов является весьма важной для работы различных оптических систем, в частности, объективов высокой разрешающей способности и их пленочных просветляющих покрытий. Загрязнение газовыми включениями теплоносителя излучающей струи нежелательно, главным образом, из-за ухудшения эффективности работы сборника капель. Решение этих проблем несколько упрощается вследствие низкого давления внешней среды ( $1,3 \cdot 10^{-5}$  Па), при котором длина пробега молекул составляет величину порядка нескольких километров. В этих условиях для предотвращения загрязнений весьма эффективно использование экранирующих ребер и перегородок.

Проблема компенсации электрического заряда капель должна решаться, главным образом, на этапе образования капель, что позволяет использовать стандартные методы нейтрализации, разработанные в технике электроракетных двигателей.

В.М.М.

### Литература

1. A. T. Mattick and A. Hertzberg. Liquid droplet radiators for heat rejection in space. Proc. 15th IECEC Meeting. Seattle, Washington (1980).
2. A. T. Mattick and A. Hertzberg. Liquid droplet radiators for heat rejection in space. *Energy*; 5, 387-393 (1981).
3. J. L. Kuhn and R. A. Meyers, Ink jet printing. *Sci. Am.* 249, 162-178 (1979).
4. Extraterrestrial processing and manufacturing of large space systems. NASA CR-161293 (1979).
5. A. V. Sokolov. *Optical Properties of Metals*. Elsevier, New York (1967).
6. H. Fechtig. *In Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids*. Chap. 20. pp. 209-219. NASA SP-319 (1971).
7. H. Oman and Gregory D. L., Solar power satellites-heat engines or solar cell? *J Energy* 5, 132-137 (1981).
8. B. Jackson, *Liquid Metals Handbook — Sodium (NaK) Supplement*, Chap. 4, pp. 405-436. US Atomic Energy Commission (1954).

9. Woodcock, Solar power satellite, system definition study. Boeing Aerospace Company Report D180-20689-2 (1977).

10. J. R. Powell, Botts T. E. and Hertzberg A., Applications of power beaming from space-based nuclear power stations. Proc. 16th IECEC Meeting. Atlanta, Georgia (1981).

11. S. Hayes, Rotating boom droplet radiator. *AIAA Student Conference, Point Mugu, California 30 April-2 May 1981.*

12. Y. Nagano. Laser drilling. *Technocrat* 11(11), 19-25 (1971).

Астронавтика и ракетодинамика, №2, 1983(?).

OCR И.Мусеев, 14.02.2010.

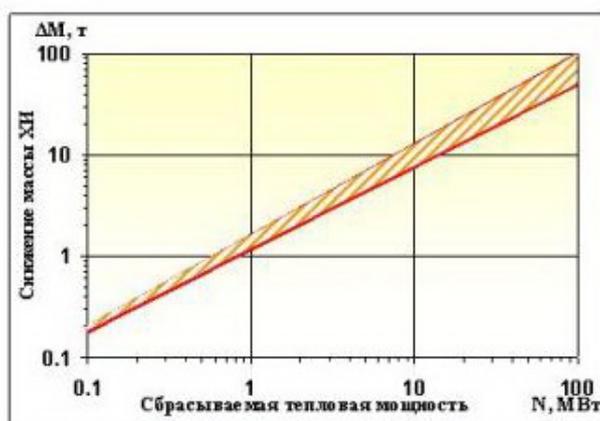
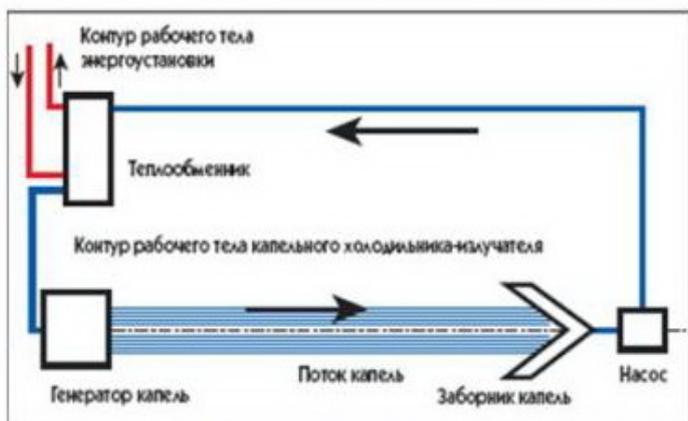
<http://path-2.narod.ru>

### **Примечание.**

Поводом отцифровать эту статью, дав, таким образом, ей жизнь в Косморунете, послужил Доклад А.С.Коротеева, директора ФГУП «Центр Келдыша»: «Актуальные задачи в космонавтике XXI века» на первом Международном специализированном симпозиуме «Космос и глобальная безопасность человечества» -

<http://www.roscosmos.ru/main.php?id=2&nid=8069> .

В презентации я увидел знакомую картинку:



и в очередной раз подумал «все новое – это хорошо забытое старое».

Одна из важнейших проблем ДУ для МП – сброс огромного количества тепла. Традиционные радиаторы получаются чрезмерно тяжелыми, и я рассматривал вошедшие тогда в моду тепловые трубки. И, конечно, данная статья, которая мне попала в ГПНТБ где-то в 1983 г. предлагала существенно лучший вариант.

Качество ксерокса не ахти какое, так что возможны ошибки, особенно в части индексов. Если читатель заметит – прошу сообщить по адресу, приведенному на сайте.

- *im.*