

## **Капельные холодильники-излучатели космических энергетических установок нового поколения**

**Г.В. Конюхов, А.А. Коротеев**

*Рассмотрен новый тип космических излучателей, основанных на явлении радиационного охлаждения специальным образом сформированной мелкодисперсной пелены рабочего тела, свободно распространяющейся в космосе между генератором и гидросборником капельного потока.*

В настоящее время очевидна объективная необходимость увеличения энерговооруженности космических аппаратов не только «дальнего» назначения, предназначенных для исследований планет, астероидов и т.д., но и аппаратов, эксплуатирующихся на околоземных орбитах и выполняющих задачи мониторинга, связи, навигации и другие. Сегодня обсуждаются проекты космических энергоустановок с мощностями от сотен киловатт до мегаватт. Однако, принципиальной особенностью и трудностью на пути создания подобных систем, является разработка устройств сброса низкопотенциального тепла.

Для получения приемлемых к.п.д. космических энергоустановок необходим отвод тепла из низкотемпературной части цикла, осуществляемый с помощью излучателей. В настоящее время используются трубчатые излучатели, а также излучатели, выполненные на основе тепловых труб (рис. 1).

С увеличением мощности их масса составляет все более заметную долю в общей массе энергосистемы, а габариты существенно влияют на габариты солнечной установки и определяют габариты ядерной. Преимуществами традиционных излучателей являются простота и технологичность; недостатками – большая масса и метеорная уязвимость.

На рис. 2 представлены массы основных компонентов ядерной энергоустановки в зависимости от вырабатываемой мощности [1]. Анализ данных свидетельствует об особой актуальности задачи разработки легких излучателей, надежность которых не зависит от воздействия макрочастиц.

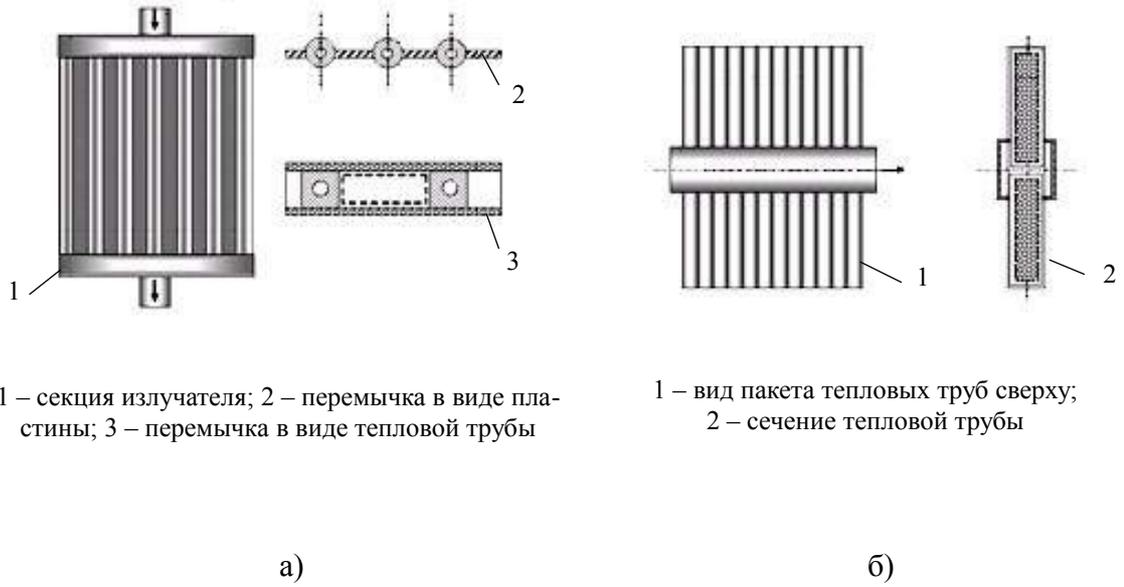


Рис. 1. Трубчатые излучатели (а) и излучатели на основе тепловых труб (б).

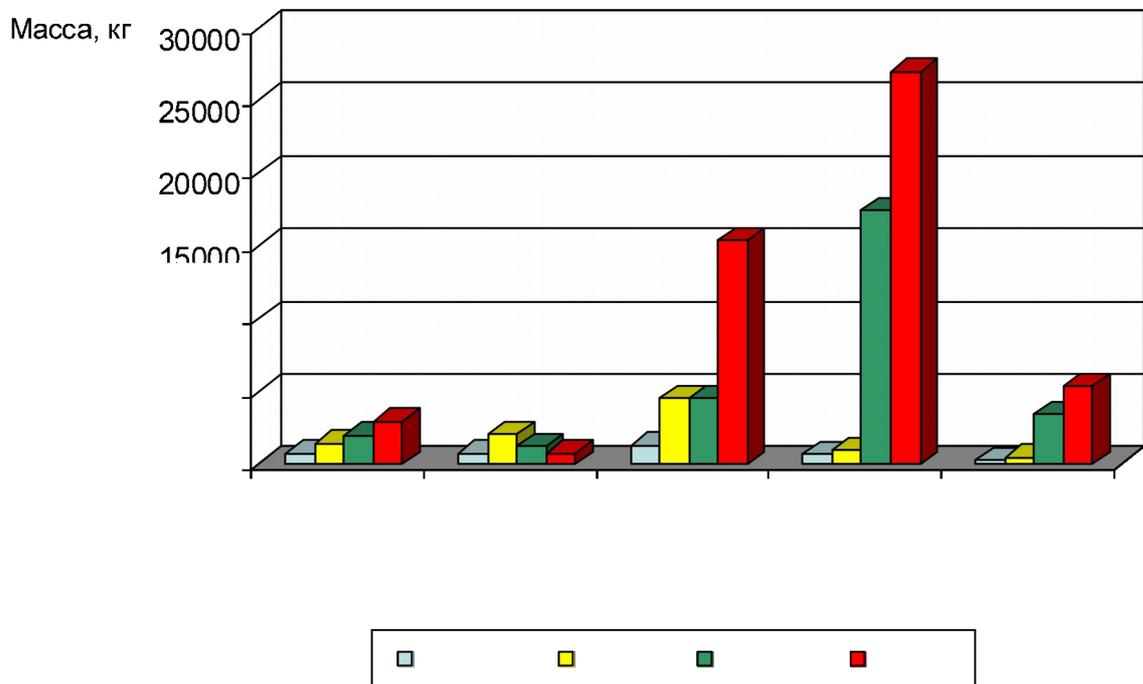


Рис. 2. Массы основных компонентов ядерной энергоустановки в зависимости от вырабатываемой мощности.

В Центре Космические технологии МАИ совместно с Федеральным государственным унитарным предприятием «Исследовательский центр им. М.В.Келдыша», ОАО «РКК «Энергия» им. С.П.Королева», и Московским энергетическим институтом осуществляются исследования и разработка капельных холодильников-излучателей (КХИ), имеющих существенно меньшие массовые показатели и состоящих, в простейшем случае, из генератора и гидросборника капельного потока (рис. 3).

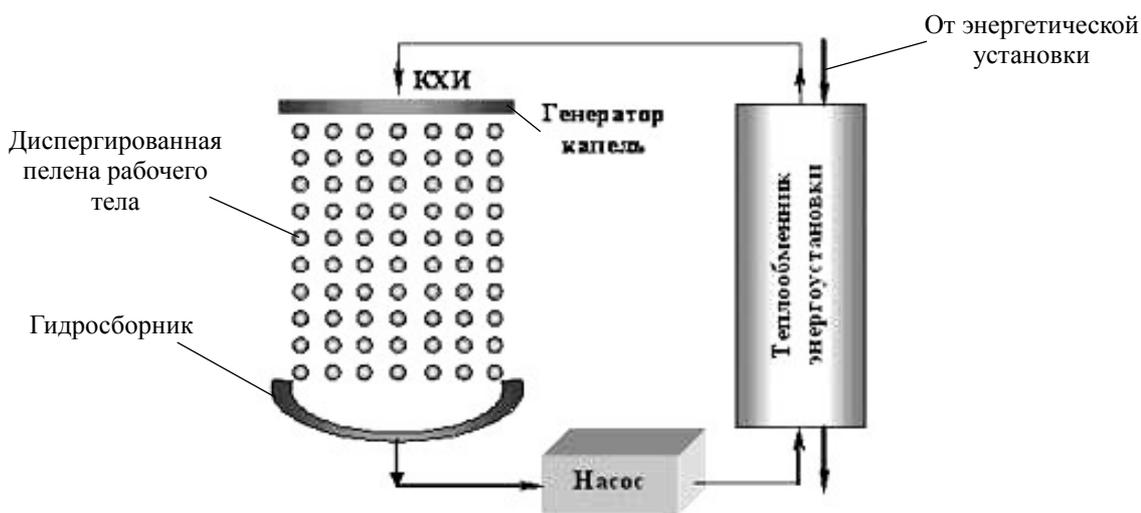


Рис. 3. Капельный холодильник-излучатель (КХИ).

С помощью генератора осуществляется формирование капельных струек горячего теплоносителя, который охлаждается на пути к гидросборнику и, собираясь в нем, направляется снова в рабочий контур. Наличие вакуума и отсутствие гравитационных сил позволяют использовать значительное количество специальным образом сформированных капельных струек теплоносителя, распространяющихся по заданным траекториям. Преимуществами таких излучателей являются: минимальное тепловое сопротивление между теплоносителем и излучающей поверхностью; неуязвимость к метеорному пробое и малая масса, не превышающая в соответствии с проведенными оценками (0,15-0,2) кг/кВт. В результате, масса теплообменника космического аппарата существенно уменьшается, а масса полезной нагрузки увеличивается в несколько раз.

Основные задачи, которые должны быть решены на пути создания капельных излучателей, сводятся к следующему.

1. Исследования закономерностей диспергирования теплоносителей. Определение зависимости модулирующих распад струек условий на характеристики образующихся капель. Создание методов учета испаряемости теплоносителя в космосе и ее влияния на работоспособность энергоустановки при длительном времени активного существования.

2. Исследования теплового излучения капельной пелены с произвольной формой внешней поверхности и оптической толщиной при ее распространении в условиях микрогравитации и глубокого вакуума. Оптимизация размеров капель с целью достижения наибольшей эффективности теплоотвода.

3. Исследования взаимодействия капель с твердыми и смоченными поверхностями различной формы с целью обеспечения максимальной эффективности их улавливания гидросборниками.

Генерация капельного потока горячего теплоносителя осуществляется методом вынужденного капиллярного распада. Упрощенная схема процесса представлена на рис. 4.

Горячий теплоноситель поступает в генератор капель, в котором установлена фильера с капиллярными отверстиями. За фильерой сначала формируются нераспавшиеся на капли струйки теплоносителя. Их распад инициируется возмущениями, источником которых могут являться, например, колебания пьезоэлемента, соединенного с генератором звуковой частоты.

Выбор рабочего тела зависит от температурного режима и давления насыщения. При 350÷450 К применяются кремнийорганика и вакуумные масла; при более высоких температурах – жидкие металлы.

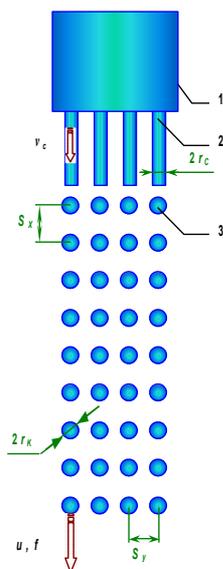


Рис. 4. Упрощенная схема генерации плоского капельного потока (1 – генератор капель; 2 – нераспавшиеся на капли струйки рабочего тела в окрестности выхода из генератора; 3 – капли монодиспергированной пелены рабочего тела).

Теоретическая задача об устойчивости цилиндрической нити невязкой жидкости была решена Рэлеем, развившим линейную теорию капиллярной неустойчивости. Он показал, что наивысшую скорость возрастания амплитуды имеют возмущающие колебания с длиной волны приблизительно в 9 раз большей диаметра нити. Под действием этих возмущений нить распадается на капли одинакового диаметра. Выражения для скорости капель  $u$  и расстояния между ними  $s$  при этом имеют следующий вид.

$$u = v_c \left( 1 - 2 \frac{\sigma}{\rho r_c v_c^2} \right), \quad (1)$$

$$s = 9r_c \left( 1 - 2 \frac{\sigma}{\rho r_c v_c^2} \right), \quad (2)$$

где  $r_c$ ,  $v_c$  – соответственно радиус и скорость движения нераспавшейся части струи;  $\rho$  – плотность теплоносителя;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

При описании вынужденного капиллярного распада, как правило, предполагается, что струя возмущается периодическим сигналом. Вводятся понятия длины волны возбуждения  $\lambda$

$$\lambda = 9,2r_c, \quad (3)$$

скорости распространения капиллярных волн  $v_k$

$$v_k = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho r_c}} \quad (4)$$

и безразмерного волнового числа  $\chi$

$$\chi = kr_c \quad (k = 2\pi / \lambda). \quad (5)$$

Характерное время нарастания возмущений в струе описывается следующим выражением

$$T_\theta = \frac{\rho r_c^3}{\sigma}. \quad (6)$$

При описании процессов, связанных с капиллярной неустойчивостью, часто используются также два безразмерных критерия: числа Вебера  $We$  и Онезорге  $Oh$ .

$$We = \frac{\rho v_c^2 r_c}{\sigma}, \quad (7)$$

$$Oh = \frac{\rho v_c r_c}{\eta}, \quad (8)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

На рис. 5 представлена так называемая кривая Рэлея – расчетная зависимость инкремента капиллярной неустойчивости от волнового числа в линейном приближении. Максимальное значение инкремента соответствует волновому числу 0,7. Величина, обратная максимальному инкременту, характеризует минимальное время распада струи и позволяет оценить длину ее нераспавшейся части.

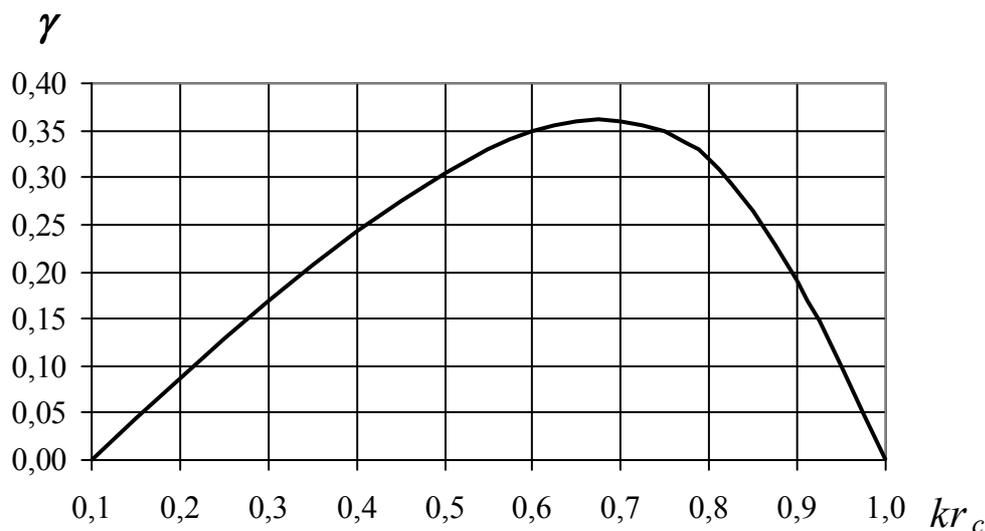


Рис. 5. Расчетная зависимость инкремента капиллярной неустойчивости от волнового числа (кривая Рэлея).

В области  $0 \leq \chi < 0,3$  на фоне регулярных длинноволновых возмущений поверхности струи быстро нарастают модулированные регулярным сигналом гармоники. В результате появляются основные капли и капли-сателлиты. Образующиеся капли имеют в общем случае значительный разброс по размерам. Область характеризуется недостаточной изученностью процессов каплеобразования.

В области  $0,3 \leq \chi < 0,5$  наблюдается выраженная зависимость результатов каплеобразования от амплитуды и частоты начального возмущения, устанавливаемая экспериментально. Если амплитуда превышает некоторое пороговое значение, реализуется бессателлитный монодисперсный распад.

Область  $0,5 \leq \chi < 1,0$  характеризуется тремя основными режимами диспергирования: бессателлитным, с наличием сателлитов, движущихся с меньшими или большими скоростями по отношению к основным каплям и сливающимися с ними и, наконец, с наличием сателлитов, которым догоняющая капля передает часть своего количества движения без поглощения (слияния). Возникновение того или иного режима устанавливается экспериментально.

В области  $\chi \geq 1,0$  происходит спонтанный распад с появлением капель, размеры которых зависят от внутренних шумов генератора или внешних шумов.

Таким образом, характеристики капельных потоков зависят от ряда начальных параметров, среди которых наиболее важными являются частота и амплитуда сигнала возбуждения, числа Вебера и Онезорге, отношение сигнал/шум.

Влияние начальных параметров на результаты диспергирования вакуумного масла иллюстрирует рис. 6., на котором заметно улучшение монодисперсности при увеличении частоты каплеобразующих колебаний от 500 Гц до оптимального для условий эксперимента значения 5 кГц.

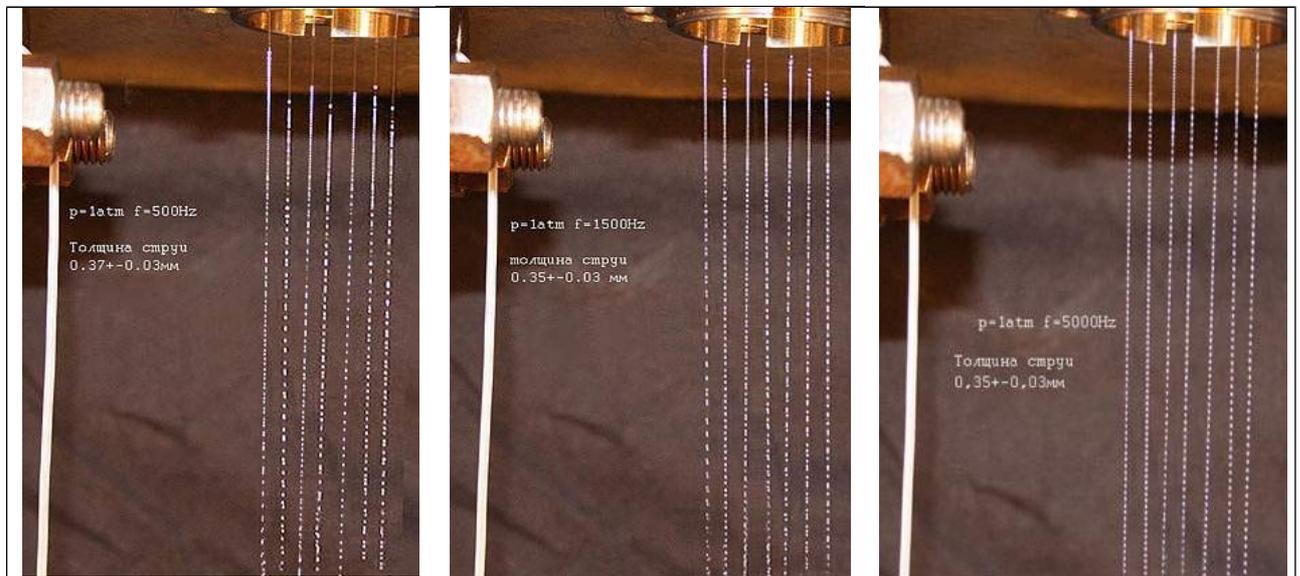


Рис. 6. Влияние начальных параметров на результаты диспергирования вакуумного масла.

Диспергирование теплоносителей космических энергоустановок имеет специфическую особенность, в общем случае значительно затрудняющую получение пелены с требуемыми ха-

рактическими. Она обусловлена необычайно высокими требованиями, предъявляемыми к точности изготовления фильер генераторов.

На рис. 7 изображен чертеж простейшей фильеры с рядным расположением системы всего семи отверстий.

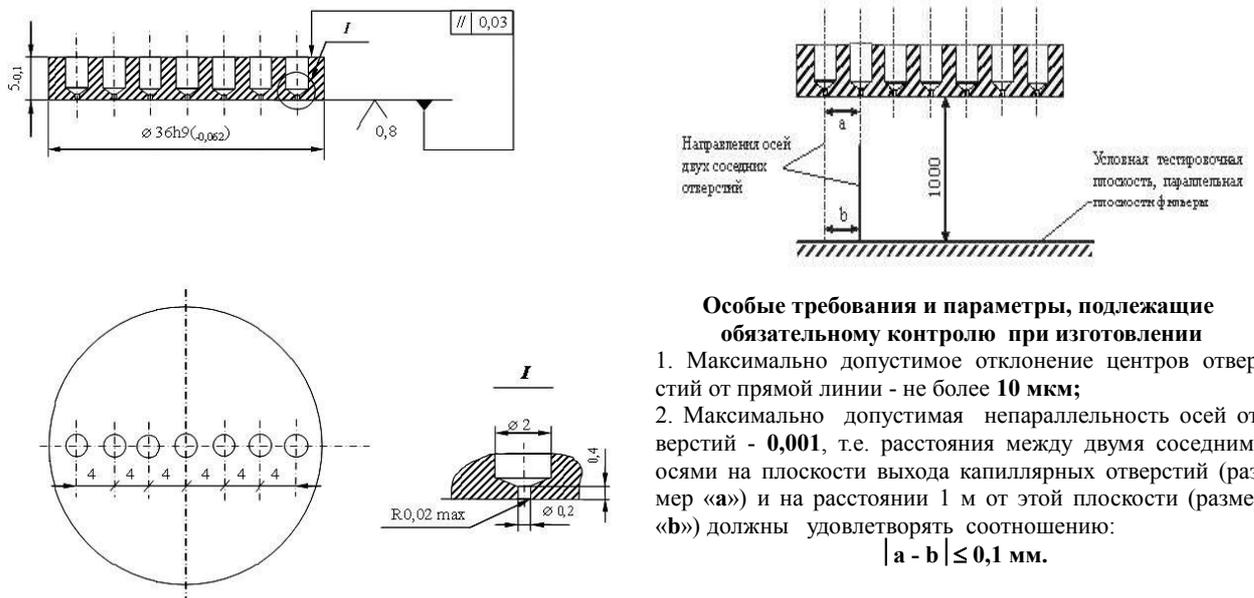


Рис. 7. Чертеж фильеры с рядным расположением семи отверстий.

Изучение чертежа свидетельствует об очень высокой точности, предъявляемой к взаимному расположению центров отверстий и параллельности их осей, нереализуемой в наземных монодисперсных технологиях. Требования становятся понятными, если учесть, что пролетные расстояния между генератором и гидросборником могут достигать нескольких метров. Даже незначительные отклонения траекторий капель от заданных приведут к выходу каких-либо из них за пределы гидросборника и потере теплоносителя, отягченной загрязнением окружающего пространства. На рис. 8 представлена типичная картина отклонений струек, возникших из-за неточностей изготовления фильеры, при достигнутой хорошей монодисперсности.

Сегодня можно сказать о том, что в России и в других странах не существует отработанной технологии изготовления большого количества (свыше 100- 1000) капиллярных отверстий с приведенной точностью. Авторами апробированы различные технологии формирования таких отверстий (сверление, электроэрозионные, лазерные и электроннолучевые методы, выдавливание и др.). В настоящее время получены хорошие результаты для фильер с количеством отверстий до ста. Технология постоянно совершенствуется, однако говорить о ее полном освоении преждевременно.



Рис. 8. Типичная картина отклонений струек, возникших из-за неточностей изготовления фильеры.

Фундаментальные вопросы радиационного охлаждения капель будут рассмотрены в следующих публикациях.

Результаты проводимых исследований активно используются при создании экспериментального модуля капельного излучателя для проведения его отработок на МКС. А первый космический эксперимент с подобным излучателем состоялся в 2000 году на орбитальном комплексе «Мир». Его целью являлось исследование закономерностей рабочего процесса излучателя в условиях микрогравитации и глубокого вакуума. Эксперимент проведен на модели излучателя (рис. 9), состоящей из вакуумной камеры, двух генераторов капель (ГК1, ГК2), гидросборника, а также иллюминаторов подсветки и видеосъемки. Особенностью гидросборника явилась возможность формирования на его внутренней поверхности тонкой пленки рабочего тела для «мягкого» улавливания капель без разбрызгивания и вспенивания.

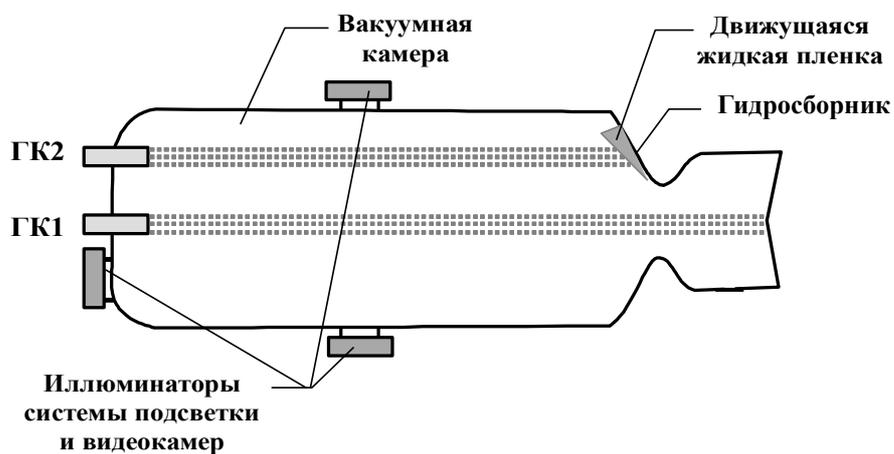


Рис. 9. Модель излучателя.

Проведены исследования генерации потока капель вакуумного масла, их движения и сбора. Эксперимент выполнен в полном объеме. Получены упорядоченные потоки капель и стабильная несущая пленка на стенке гидросборника, обеспечивающая их надежное улавливание (рис. 10).

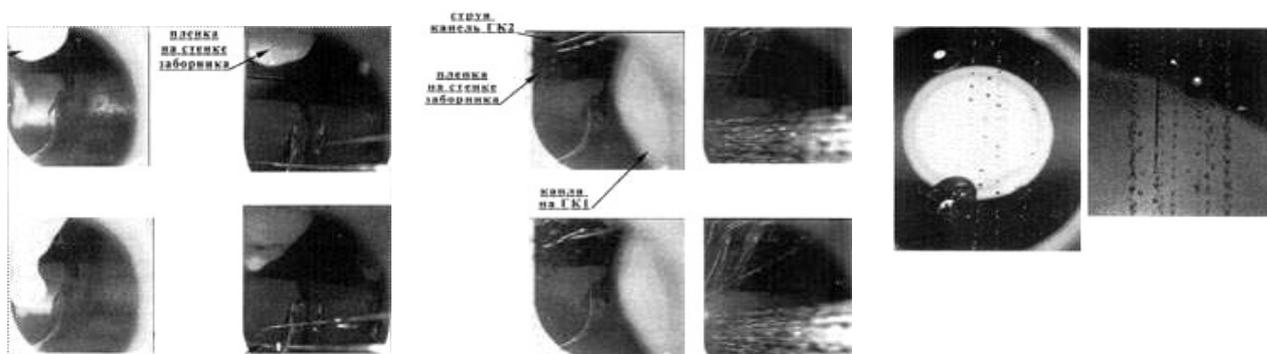
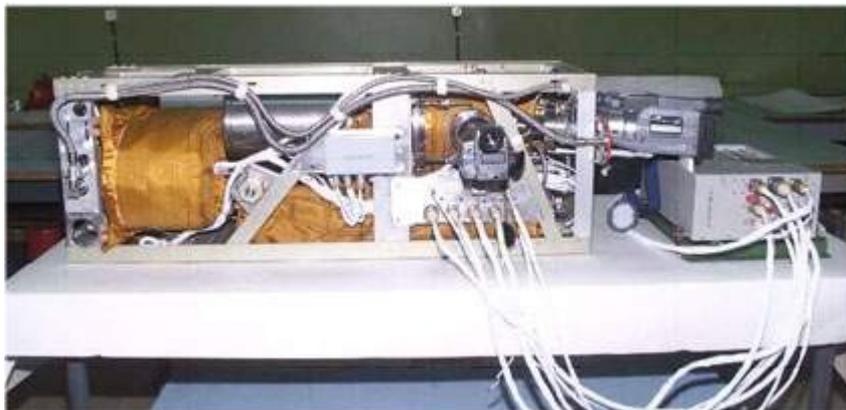


Рис. 10. Основные этапы космического эксперимента на модели капельного холодильника-излучателя.

На рис. 11 изображены фотографии экспериментального модуля излучателя и установки с капельным излучателем на борту ОКС «Мир».



а)



б)

Рис.11. Фотографии космического модуля капельного холодильника-излучателя (а) и общего вида установки с капельным излучателем на борту ОКС «Мир» (б).

### **Список литературы**

1. Feig J.R. Radiator concepts for high power systems in space. – Space nuclear power systems, 1984, Proc. 1-st Symposium on space nuclear power systems, 1984, v.2.
- 

### **Сведения об авторах**

Конюхов Георгий Владимирович, главный специалист Федерального государственного унитарного предприятия Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, д.т.н., проф.

Коротеев Анатолий Анатольевич, директор центра Космические технологии Московского авиационного института (государственного технического университета), д.т.н., проф., член-корреспондент РАН.

## **LIQUID DROPLET RADIATORS OF NEWGENERATION SPACE POWERPLANTS**

**G.V. Konioukhov, A.A. Koroteev**

*Brand new type of space radiators is considered. These radiators are based on the radiative cooling of specially formed fine-dyspersated shroud of actuating medium, freely spreading in space between liquid droplets generator and hydrocollector.*