УДК 629.786

## ОСОБЕННОСТИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ КАПЕЛЬ В БЕСКАРКАСНЫХ СИСТЕМАХ ОТВОДА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В КОСМОСЕ

© 2021 г. А. А. Сафронов<sup>1, \*</sup>, А. А. Коротеев<sup>2</sup>, А. В. Хлынов<sup>1</sup>, Н. И. Филатов<sup>1</sup>, А. Л. Григорьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша" (АО ГНЦ "Центр Келдыша"), Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

\*e-mail: a.a.safr@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.03.2021 г. После доработки 02.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

Экспериментально и теоретически исследованы закономерности отключения генераторов капель в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе. Показано, что определяющим механизмом, приводящим к формированию пленки жидкости на поверхности генератора, является расширение пузырей газа, присутствующих в гидросистеме. Предложена методика расчета времени остановки генератора и объема пленки, формируемой на его поверхности.

Ключевые слова: капельный холодильник-излучатель, генератор капель

DOI: 10.31857/S0002331021040129

Решение ряда задач, связанных с освоением космического пространства, требует значительного повышения мощности энергетических установок космических аппаратов. Для отвода низкопотенциального тепла, как правило, используются панельные холодильники—излучатели. С увеличением мощности площадь их поверхности, масса и метеоритная уязвимость быстро возрастают. Выходом представляется использование капельного холодильника—излучателя (КХИ), основанного на радиационном остывании специальным образом сформированного капельного потока [1] с последующим его улавливанием и замыканием гидравлического контура.

При включении и отключении генератора капель КХИ на его внешней поверхности формируется пленка жидкости, препятствующая ее истечению при повторном включении. Объем пленки не может быть возвращен в гидравлическую систему излучателя, а исследование ее формирования является актуальной задачей, решение которой необходимо для всестороннего понимания закономерностей функционирования КХИ.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваются генераторы, создающие капли методом вынужденного капиллярного распада струй (рис. 1) вакуумного масла ВМ1-С, истекающего через капиллярные каналы длиной *I*, значительно превышающей их радиус *r*. Для описания расходной характеристики генератора использован закон Пуазейля:



**Рис. 1.** Гидросистема КХИ: *1* – емкость с рабочим телом; *2* – насос; *3* – электрогидроклапан; *4* – трубопровод; *5* – генератор капель; *6* – струи рабочего тела.

$$q = -n\frac{\pi r^4}{8\mu l}P = -\alpha P,\tag{1}$$

где q – объемный расход рабочего тела через каналы n каналов;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости; P – давление во внутреннем объеме генератора;  $\alpha$  – характеристика, определяемая соотношением (1). В дальнейшем принято n = 7; 2r = 0.5 мм; l = 12 мм.

При малых расходах из-за действия капиллярных сил справедливость (1) нарушается. Считалось, что при понижении давления до величины

$$P_{\rm K} = \frac{2\sigma}{r} \sim 10^{-3} \text{ atm.}, \tag{2}$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение, истечение жидкости из генератора прекращается. Формирование струй прекращается при скорости жидкости меньше  $V_{\min}$ , достаточной для преодоления капиллярных сил [2, 3]:

$$\frac{\sigma}{r} = \frac{\rho V_{\min}^2}{2}.$$
(3)

В рассматриваемом случае  $V_{\min} \approx 0.25$  м/с. Согласно (1), такой скорости соответствует давление во внутреннем объеме генератора

$$P_* = \frac{8\mu l}{r^2} \sqrt{\frac{2\sigma}{r\rho}}.$$
(4)

При температуре 70°С –  $P_* \approx 0.25$  атм., а при 18°С –  $P_* \sim 1.5$  атм.

Рабочее тело подается в генератор насосом через трубопровод длиной L = 3 м. Суммарный объем трубопровода и генератора равен  $V_0$ . Из экспериментальных наблюдений следует, что после перекрытия клапана 3 истечение жидкости из генератора продолжается некоторое время с уменьшением скорости до  $V_{\min}$ . В дальнейшем жидкость формирует пленку на поверхности фильеры генератора. Процесс прекращается при снижении давления в генераторе до  $P_{\kappa}$ .

В работе экспериментально и теоретически исследованы закономерности изменения давления в генераторе, а также зависимость объема пленки от параметров работы КХИ.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Предполагается, что давление жидкости постоянно по длине питающего трубопровода и объему генератора капель. Вследствие поджатия объем жидкости в трубопроводе уменьшается на величину  $\delta V$ :

$$\delta V = \frac{P}{\rho c^2} V_0,\tag{5}$$

где c – скорость звука в жидкости. Если внутренний радиус трубы равен 4 мм,  $V_0 \sim 1.5 \times 10^5$  мм<sup>3</sup>. При  $P \sim 1$  атм.  $\delta V \sim 10$  мм<sup>3</sup>. Изменение количества вещества за счет некоторого расширения трубопровода оказывается пренебрежимо малым.

В момент времени t = 0 клапан 3 (рис. 1) мгновенно закрывается, после чего жидкость может вытекать только через капиллярные отверстия фильеры генератора капель. Поскольку сжатие происходит линейно, зависимость  $\delta V$  от давления можно представить в виде:

$$P = P_0 \frac{\delta V}{\delta V_0},\tag{6}$$

где  $\delta V_0$  — уменьшение объема жидкости при давлении  $P_0$ . Дифференциальное уравнение, характеризующее уменьшения объема жидкости, имеет вид:

$$\dot{\delta V} = -n \frac{\pi r^4}{8\mu l} P_0 \frac{\delta V}{\delta V_0}.$$
(7)

Считая, что

$$\tau_0 = \frac{8\mu l}{n\pi r^4} \frac{1}{\rho c^2} V_0 \tag{8}$$

можно получить:

$$\delta V = -\frac{1}{\tau_0} \delta V. \tag{9}$$

Выражение для расчета  $\tau_0$  также можно записать в виде

$$\tau_{\rm o} = \frac{V_0}{q_0} \frac{P_0}{\rho c^2} = \frac{V_0}{\alpha \rho c^2},\tag{10}$$

где  $q_0$  – расход через генератор капель при давлении  $P_0$ .

Из представленных соотношений следует, что при остановке генератора давление в нем меняется по закону

$$P(t) = P_0 \exp\left(-t/\tau_0\right). \tag{11}$$

При температуре рабочего тела 70°С и скорости истечения из генератора 2 м/с,  $\tau_o \approx 2 \times 10^{-3}$  с. По порядку величины это значение совпадает со временем, необходимым звуковой волне для распространения от клапана до генератора. Если температура рав-



Рис. 2. Зависимости давления от времени для различных значений объема пузырей газа в трубопроводе.

на 18°C  $\tau_0 \approx 2 \times 10^{-2}$  с. Согласно (11), при выключении формирование пленки начинается через  $t \approx 1.5\tau_0$ . К этому моменту в трубопроводе останется объем рабочего тела

$$\delta V = \delta V_0 e^{-1.5} \approx 0.2 \delta V_0. \tag{12}$$

Считая, что  $\delta V_0 \approx 15 \text{ мм}^3$ , нетрудно получить объем пленки  $\delta V \approx 3 \text{ мм}^3$ . На одно капиллярное отверстие приходится ~0.5 мм<sup>3</sup> избыточной жидкости, соответствующий объему сферической капли радиусом ~0.5 мм.

Если при давлении  $P_0$  в трубопроводе присутствуют пузыри газа суммарным объемом  $V_b$ , при истечении жидкости за счет их изотермического расширения, давление изменяется по закону

$$P(t) = P_0 \left( 1 + \frac{2\alpha P_0}{V_b} t \right)^{-1/2} = P_0 \left( 1 + \beta t \right)^{-1/2}.$$
(13)

Когда истечение жидкости из генератора происходит за счет совместного расширения пузырей и поджатой жидкости, уравнение состояния среды описывалось соотношением

$$\delta V(P) = \frac{V_b P_0}{P} - \frac{V_0}{\rho c^2} P.$$
 (14)

С его учетом уравнение изменения давления принимает вид:

$$\frac{dP}{dt} \left( \frac{V_0}{\rho c^2} + \frac{V_b P_0}{P^2} \right) = -q_0 P.$$
(15)

Данное уравнение аналитически решается с использованием специальных функций. Его численные решения представлены на рис. 2 для различных значений  $\Delta = V_b/\delta V_0$  с использованием безразмерных времени и давления (обезразмеривание, соответственно по  $\tau_0$  и  $P_0$ ). Наличие пузырей качественно меняет закономерность изменения дав-



**Рис. 3.** Гидросистема КХИ с дополнительной емкостью для сброса давления: *1* – емкость с рабочим телом; *2* – насос; *3*, *7* – электрогидроклапаны; *4* – трубопровод; *5* – генератор капель; *6* – струи рабочего тела; *8* – дополнительная емкость.

ления. При объеме пузыря несколько кубических миллиметров время остановки генератора увеличивается в сотни раз. Когда объем пузырей в несколько раз превышает  $\delta V_0$ , время истечения жидкости и формирования пленки составит десятки минут.

При малых значениях  $\Delta$  возможно выделение двух стадий уменьшения давления: сначала — по закону, близкому к экспоненциальному, а после уменьшения давления до некоторой величины  $P_1$  — в соответствии с зависимостью, близкой к (13). Для  $P_1$  возможна следующая оценка:

$$P_1 = P_0 \sqrt{\Delta}.$$
 (16)

Когда длина капиллярных отверстий в фильере генератора капель сравнима с их диаметром, расход жидкости зависит от давления по следующему закону:

$$q = \gamma \sqrt{P}$$
,

где ү – некоторая константа. Аналог уравнения (7) примет вид:

$$\dot{\delta V} = -n\pi r^2 \alpha \sqrt{P_0 \frac{\delta V}{\delta V_0}}$$

Из-за нелинейности расходной характеристики при равных скоростях истечения и диаметрах струй время выключения генератора с короткими каналами оказывается заметно большим.

Для рассмотрения возможности ускорения переходных процессов при выключении генератора за счет использования дополнительной емкости для сброса давления (рис. 3) считается, что открытие клапана 7 происходит одновременно с закрытием 3. Предполагается, что давление в емкости 8 равно нулю, а гидравлическое сопротивление трубопровода, соединяющего емкость 8 с генератором, описывается законом Пуазейля и составляет для расхода  $q_0 \Delta P \sim 0.1$  атм. После перекрытия клапана 3 жидкость преимущественно будет истекать в емкость 8 по закономерностям, описываемым зависимо-



Рис. 4. Экспериментальная зависимость давления от времени для недегазированной жидкости.

стями (1)–(16). Для натурных значений параметров КХИ уменьшение давления при наличии дополнительной емкости происходит приблизительно на порядок быстрее, чем без нее. При  $\Delta > 1$  истечение через генератор прекратится через несколько минут после перекрытия клапана 3, а объем сформировавшейся пленки будет на порядок меньше. Если давление  $P_e \sim 0.1$  атм., отвод рабочего тела в емкость продолжается до достижения соответствующего значения в трубопроводе. В этом случае введение дополнительной емкости приведет к уменьшению объема пленки в 1.5–2 раза.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель КХИ находилась в вакуумной камере с давлением  $\sim 10^{-3}$  атм. Использовался нормально закрытый клапан (время закрытия — менее 0.005 с). Рабочее тело с температурой 18°С хранилось в вакуумной камере в открытой емкости диаметром 0.2 м высотой 0.5 м и подавалось на вход шестеренного насоса под действием силы тяжести. Зависимость давления во внутреннем объеме генератора капель от времени измерялась кварцевым датчиком давления с интерфейсом токовой петли. Показания датчика снимались осциллографом.

Первый эксперимент проводился с предварительно недегазированной жидкостью. Зависимость ее давления в генераторе от времени после перекрытия клапана представлена на рис. 4. Сплошной линией изображена экспериментально измеренная зависимость, пунктиром – аппроксимация экспериментальных данных зависимостью (13). Из анализа графиков следует, что определяющим механизмом понижения давления было расширение пузырей газа. Апроксимационная зависимость не описывает начальную стадию падения давления. Отличие модели (13) от экспериментальных данных объясняется использованием локальных уравнений для теоретического описания. Лучшая аппроксимация соответствует значению  $\beta = 11 \text{ c}^{-1}$ . Используя эту величину, из зависимости (13) можно получить, что объем пузыря при стационарной работе генератора ( $P_0 = 8.5 \text{ атм.}$ ) составляет  $V_b \sim 0.5 \text{ см}^3$ . Это значение хорошо согласуется с величиной, рассчитанной из соотношения (16) при  $P_1 \approx 4$  атм. и  $\delta V_0 \approx 130 \text{ мм}^3$ .



Рис. 5. Экспериментальная зависимость давления от времени для дегазированной жидкости.



Рис. 6. Экспериментальная зависимость давления от времени для дегазированной жидкости.

Второй эксперимент проводился с предварительно дегазированной в течение двух суток жидкостью. Снижение давления происходит в два этапа. В течение ~0.03 с после выключения генератора давление снижается по закону, близкому к экспоненциальному, на ~2.5 атм. (рис. 5). Затем давление медленно снижается в соответствии с аппроксимацией (13) при  $\beta = 4 \text{ c}^{-1}$  (рис. 6). Такой величине  $\beta$  соответствует объем пузыря равный  $V_b \sim 0.3 \text{ см}^3$  при  $P_0 = 4.5$  атм. Это значение хорошо согласуется со значением объема, рассчитанного с помощью (16). Первая стадия снижения давления в эксперименте описывается зависимостью (11). Расчет величины  $\tau_0$  проводился путем построения графика давления в логарифмических координатах (рис. 5). Экспериментально измеренное значение  $\tau_0 \approx 0.022$  с хорошо согласуется с приведенной выше теоретической оценкой  $\tau_0 \approx 2 \times 10^{-2}$  с.

#### выводы

Ключевым механизмом формирования пленки жидкости при выключении генератора капель является расширение пузырей газа, находящихся в его внутреннем объеме и питающем трубопроводе. Для предотвращения образования пленки необходима дегазация жидкости и вакуумирование гидросистемы перед запуском КХИ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00045).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Влияние структуры капельной пелены на мощность бескаркасных космических излучателей и эффективность энергетических установок. Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54 № 5. С. 817–820.
- Sunol F., Gonzalez-Cinca R. Liquid jet breakup and subsequent droplet dynamics under normal gravity and in microgravity conditions. Physics of Fluids. 2015. V. 27, 077102. https://doi.org/10.1063/1.4927365
- Umemura A., Osaka J., Shinjo J. Coherent capillary wave structure revealed by ISS experiments for spontaneous nozzle jet disintegration. Microgravity Sci. Technol. 2020. V. 32. P. 369–397. https://doi.org/10.1007/s12217-019-09756-0

# Features of Disconnecting Droplet Generators in Frame-Free Low-Potential Heat Removal Systems in Space

# A. A. Safronov<sup>a</sup>, \*, A. A. Koroteev<sup>b</sup>, A. V. Khlynov<sup>a</sup>, N. I. Filatov<sup>a</sup>, and A. L. Grigoriev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Keldysh Center, Moscow, Russia <sup>b</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia \*e-mail: a.a.safr@yandex.ru

The regularities of switching off droplet generators in frameless systems for removing lowgrade heat in space have been studied experimentally and theoretically. It is shown that the defining mechanism leading to the formation of a liquid film on the generator surface is the expansion of gas bubbles present in the hydraulic system. A method is proposed for calculating the stopping time of the generator and the volume of the film formed on its surface.

Keywords: liquid droplet radiator, drip generator