

УДК 532.529

Закономерности взаимодействия капель сверхвысоковакуумных теплоносителей с поверхностями уловителей бескаркасных систем теплоотвода в космосе*

**А.А. Коротеев¹, Н.В. Бондарева¹, Ю.А. Нагель², Н.И. Филатов²,
И.В. Байденко²**

¹*Московский авиационный институт*

²*Исследовательский центр им. М.В.Келдыша, Москва*

E-mail: chkt4@yandex.ru

Рассмотрены закономерности взаимодействия капель сверхвысоковакуумных жидких рабочих тел космических капельных излучателей с поверхностями улавливающих устройств. Проведены сопоставления с характеристиками взаимодействия капель дистиллированной воды. Обоснована достижимость реализации в космосе режимов улавливания, характеризующихся отсутствием вторичного каплеобразования.

Ключевые слова: капельный холодильник-излучатель, генератор капельного потока, уловитель, сверхвысоковакуумный теплоноситель, капельная пелена.

Введение

Разрабатываемые в настоящее время космические капельные холодильники-излучатели (КХИ) основаны на радиационном охлаждении специальным образом сформированной упорядоченной пелены рабочего тела. Излучатели (рис. 1) состоят из генератора и уловителя капельного потока, а их основными достоинствами являются минимальное термическое сопротивление между теплоносителем и излучающей поверхностью, неуязвимость к метеоритному пробою и низкая удельная масса [1]. С помощью генератора в космосе формируется пелена мелкодисперсных капель нагретого сверхвысоковакуумного теплоносителя (СВВТ). На пути от генератора к уловителю происходит его охлаждение. Далее капли собираются в уловителе и остывшее рабочее тело возвращается в контур энергоустановки. Реализация достоинств КХИ в наибольшей степени осуществима при высоких значениях отводимой тепловой мощности (более 100 кВт) [2]; основные результаты их исследований изложены в работах [1–6].

Одной из важнейших задач, требующих решения на пути к использованию КХИ в космосе, является организация эффективного улавливания капель. В уловителях активного типа капли принимаются на вращающуюся поверхность, увлекаются под действием

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (соглашение № 14-19-00503).

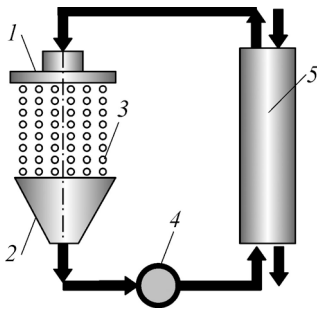


Рис. 1. Капельный холодильник-излучатель.

1 — генератор капельного потока, 2 — уловитель капельного потока, 3 — диспергированная капельная пелена, 4 — насос, 5 — теплообменник энергоустановки.

инерционных сил и направляются ко входу замыкающего контур насоса. Пассивные уловители обычно выполняются в виде усеченных конуса или пирамиды с большим основанием, ориентированным в сторону входа движущихся капель (рис. 1). Эффективность улавливания зависит от успешного решения трех задач: обеспечения отсутствия вторичного каплеобразования на поверхности уловителя, продвижения жидкой пленки ко входу в насос и поддержания на входе минимального давления. Далее рассматриваются основные результаты исследований, направленных на решение первой из перечисленных задач.

Взаимодействие капли с поверхностью описывается критериями Рейнольдса (Re), Вебера (We) и Фруда (Fr). Известной является графическая зависимость [7], связывающая значение числа Вебера и равновесного краевого угла смачивания. Ее использование позволяет прогнозировать наступление одного из трех режимов: прилипания капли без отката, прилипания после отката или отрыва в конце отката. Взаимодействие с наклонной или вращающейся поверхностью в значительной степени зависит от угла α ее наклона к траектории движения капли или от отношения нормальной и касательной к поверхности компонент скорости капли [8, 9].

Метод исследования

Экспериментальная установка состоит из термостатируемого объема с размещенным внутри многоцелевым штативом, допускающим закрепление капилляров с внутренним диаметром 510 мкм. Расстояние между нижним торцом капиллярной трубки и поверхностью регулировалось в пределах 0,1–0,5 м. Таким образом задавалась скорость соударения капли. Исследовались два СВВТ: пентафенилтриметилтрисилоксан (ПФТМС), ионная жидкость (ИЖ) — 1,2-диметил-3-((1',1',3',3'-тетраметил-3'-фенилдисилоксанил)метил)имидазолий бис (трифторметил-сульфонил)имид, а также дважды дистиллированная вода с целью проведения необходимых сопоставлений. Значения плотности, коэффициентов динамической вязкости и поверхностного натяжения жидкостей представлены в табл. 1.

Капли формировались в результате порционного выдавливания требуемого объема жидкостей. Диаметры капель ПФТМС составляли 2,8 мм, ИЖ — 2,7 мм, воды — 3,6 мм. Воспроизводилось падение капель на сухую плоскую поверхность из нержавеющей стали, расположенную под углами 90, 60, 45, 30° к траектории движения капель, и нормальное падение на смоченную поверхность. Соударение регистрировалось высокоскоростной камерой высокого разрешения Phantom V-2511. Скорость капли определялась из решения уравнения ее движения с учетом сопротивления воздуха.

Таблица 1

Значения плотности ρ , коэффициентов динамической вязкости μ и поверхностного натяжения σ жидкостей при температуре 360 К

Жидкость	ρ , кг/м ³	μ , Па·с	σ , Н/м
Дистиллированная вода	967	0,0003	0,067
ПФТМС	1045	0,016	0,028
ИЖ	1550	0,013	0,035

Взаимодействие капле с сухой поверхностью

На рис. 2 представлены фотографии взаимодействия капле воды и двух СВВТ при $We = 525$. Наличие «сдвоенных капле» в начале удара объясняется отражением падающей капле полированной поверхностью. Применительно к воде с некоторой долей допущения можно считать, что полученные результаты коррелируют с изложенными в работе [7] в части определения вида взаимодействия: имеет место прилипание

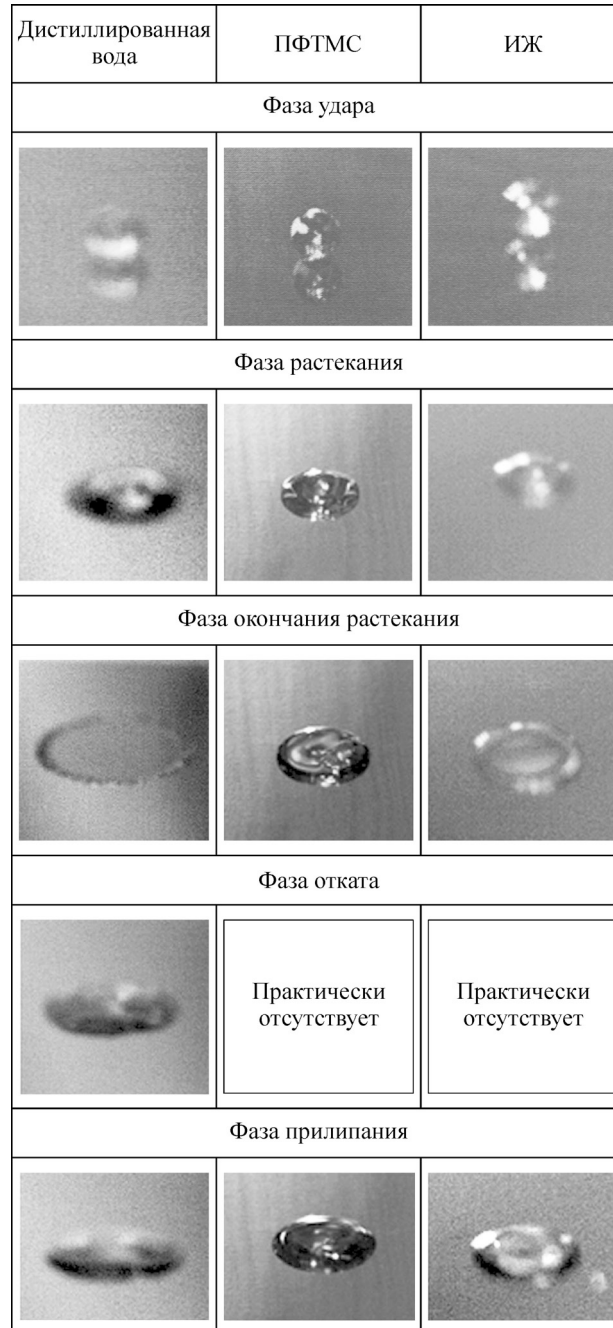


Рис. 2. Фазы взаимодействия капле дистиллированной воды и двух видов СВВТ с сухой поверхностью при $We = 525$.

после отката. Диаметр пятна в фазе, близкой к завершению отката, превышает невозмущенный диаметр капли более, чем в два раза. Закономерности взаимодействия с поверхностью капель СВВТ заметно отличаются: для них реализуется режим практически безоткатного прилипания. Диаметр пятна ПФТМС в конце видеосъемки превышает диаметр капли в 1,76 раза, а ИЖ — двукратно.

На взаимодействие капель с наклонной поверхностью существенное влияние оказывают гравитация и угол наклона поверхности к траектории. На рис. 3 представлены фотографии взаимодействия капель воды и двух СВВТ с поверхностью, расположенной под углами 30, 45 и 60° к траектории движения при $We = 525$. Растекание сопровождается направленным движением в условиях действия силы тяжести. Наиболее выражена фаза растекания у воды: при $\alpha = 60^\circ$ максимальный поперечный размер растекающей капли превышает ее невозмущенный диаметр в 2,1 раза. Определение продольного размера прилипшей капли затруднительно из-за неправильной формы пятна. Образующаяся «корона» также имеет неправильную форму: она более выражена в нижней части пятна. Формирующиеся на ее остриях вторичные капли впоследствии «втягиваются» в общее пятно прилипания, образуя в его нижней части выпуклый валик. При уменьшении угла между поверхностью и траекторией движения капли воды до 45° прилипание последней сохраняется, образовавшиеся на остриях «короны» 6–7 вторичных капель, в 3–4 раза меньших основной капли, остаются в нижней части пятна. Уменьшение угла до 30° приводит к уменьшению поперечного размера пятна контакта с поверхностью и срыву вторичных капель с вершин «короны». Прилипания капель к поверхности не происходит.

В результате проведения группы соответствующих экспериментов с двумя СВВТ установлено, что при любых значениях угла наклона поверхности наблюдалось полное прилипание практически без отката. При $\alpha = 60^\circ$ внешний контур прилипшего пятна сохранял форму, близкую к окружности, уменьшение угла приводило к появлению пятна с овальной формой наружной кромки. Отношение максимальных поперечного и продольного размеров пятен растекающей капли при углах 60, 45 и 30° составляет соответственно 1, 0,77, 0,55 — для ПФТМС и 1, 0,75, 0,52 — для ИЖ. Образования «короны» не происходит.

Взаимодействие капель со смоченной поверхностью

Выявление закономерностей взаимодействия капель со смоченной поверхностью необходимо для изучения функционирования пассивных ловителей, характеризующихся наличием на рабочей поверхности вспомогательной несущей пленки (ВНП) того же рабочего тела. ВНП применяется для обеспечения устойчивого движения жидкости к горловине ловителя и поддержания минимально необходимого давления для бескавитационной работы насоса. Вопросы создания и расчета характеристик таких пленок рассматривались в работах [4, 10].

На рис. 4 представлены фотографии, характеризующие взаимодействие капель воды и двух СВВТ с пленкой того же вещества с толщиной, равной диаметру падающей капли ($\delta_n = 1$) при $We = 525$. Здесь и далее все безразмерные геометрические характеристики отнесены к диаметру исходной капли. На поверхности воды (рис. 4а–4е) образуются каверна с диаметром $d_{\text{кав}} = 3,9$ и «корона» со стенками, вертикально поднимающимися из стенок кратера. Диаметр «короны» $d_{\text{кор}} = 4,9$, а ее высота $h_{\text{кор}} = 1,8$. Верх «короны» образуют 10–12 выступов неправильной геометрической формы с высотой $h_{\text{выс}} = 0,5–0,6$. Процесс сопровождается возникновением вторичных капель с безразмерным диаметром, равным 0,1–0,2. Далее происходит исчезновение (размытие) каверны и «короны» с формированием столбика Релея с высотой $h_p = 4,1$ и осредненным диаметром $d_p = 0,7$.

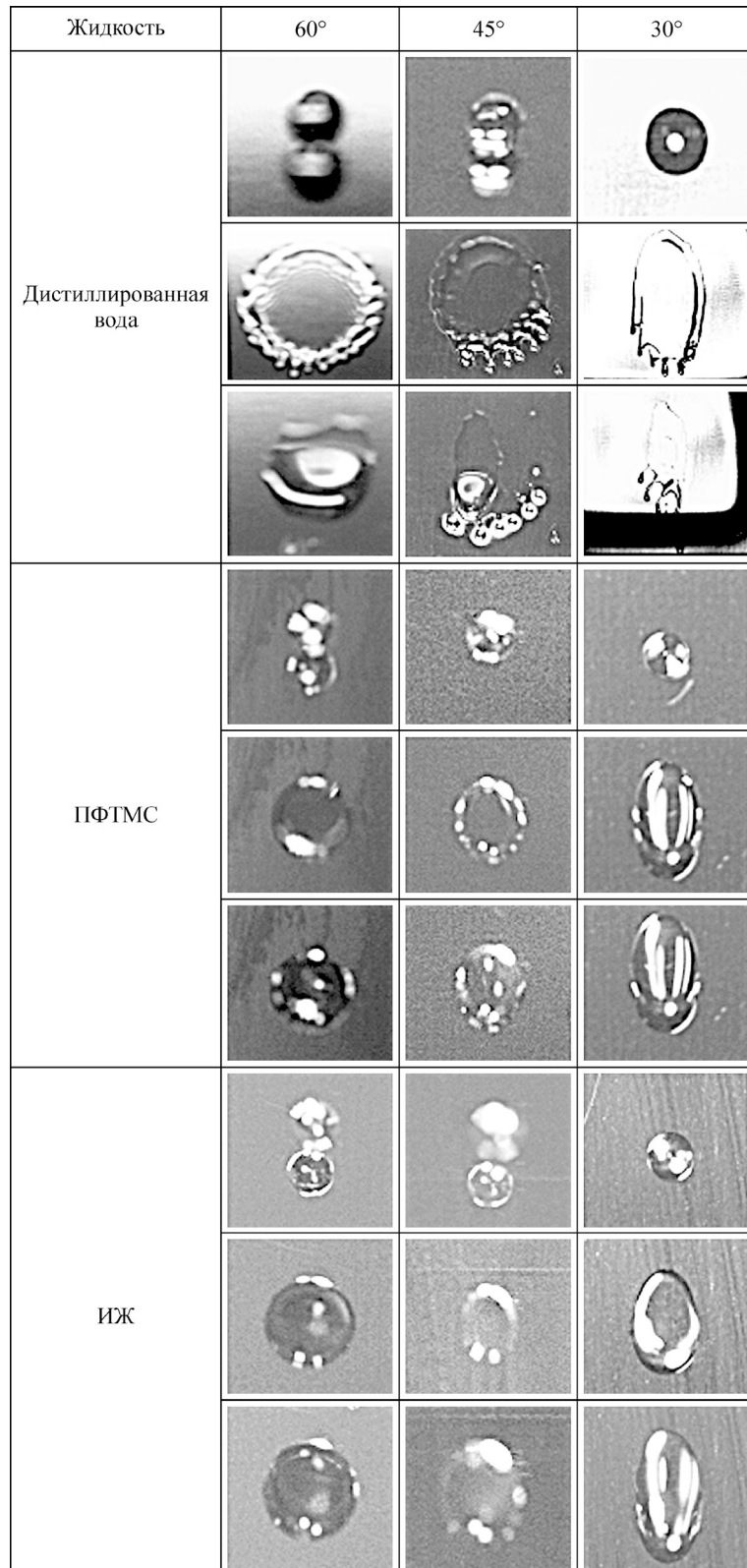


Рис. 3. Взаимодействие каплей воды и двух СВВТ с поверхностью при различных углах ее расположения к траектории движения каплей и $We = 525$.

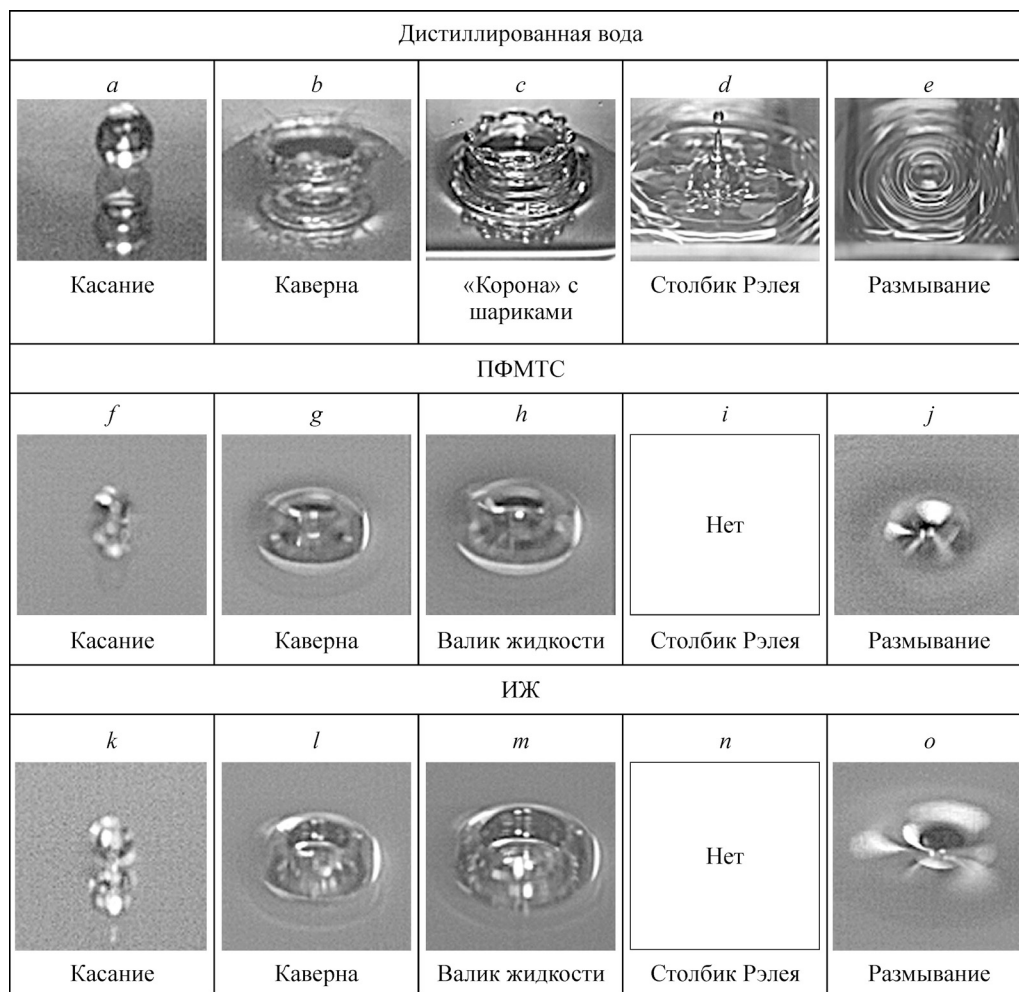


Рис. 4. Фотографии взаимодействия каплей дистиллированной воды, пентафенилтриметилтрисилоксана и ионной жидкости с пленкой того же вещества при $We = 525$, $\delta_{\text{п}} = 1$.

Приблизительно таким же значением характеризуется размер капли, образующейся на вершине столбика ($d_{\text{кр}} = 0,7-0,8$). В дальнейшем эта капля отрывается от столбика, оседание которого приводит к образованию вторичной каверны с диаметром $d_{\text{кав}2} = 3,4$, размывающейся впоследствии. Падение капли, оторвавшейся от столбика, приводит к появлению каверны третьего поколения, имеющей характерный размер $d_{\text{кав}3} = 2$. Ее размывание сопровождается затуханием процесса. Таким образом, взаимодействие капли дистиллированной воды с ее пленкой малой толщины сопровождается образованием вторичных капель, появляющихся на вершине столбика Рэлея и отрывающихся впоследствии, а также эмитируемых из верхней части образующейся «короны».

Основными отличиями взаимодействия с пленками капель СВВТ являются отсутствие выраженной «короны», столбика Рэлея и вторичных капель. На поверхностях ПФМТС и ИЖ (рис. 4*f-4o*) образуется каверна ($d_{\text{кав}} = 1,5$ — для ПФМТС, $d_{\text{кав}} = 2,5$ — для ИЖ) и валик жидкости (наружный диаметр валика $d_{\text{в}} = 2,9$ — для ПФМТС, $d_{\text{в}} = 3,3$ — для ИЖ). Высота валиков меньше, нежели «короны» воды ($h_{\text{в}} = 0,6$ — ПФМТС, $h_{\text{в}} = 0,8-0,9$ — ИЖ); дополнительных образований на их верхнем кольце не наблюдается. Развитие процесса

Таблица 2

Размеры образований, возникающих при улавливании капли пленкой того же вещества различной толщины ($We = 525$)

Параметр	Обозначение	ПМТФС; ИЖ		
		$\delta = 1$	$\delta = 3$	$\delta = 5$
Диаметр каверны	$d_{\text{кав}}$	1,54; 2,0	1,85; 3,23	2,15; 2,46
Диаметр валика	$d_{\text{в}}$	2,96; 3,15	2,77; 4,15	3,08; 4,0

приводит к постепенному исчезновению валиков и затуханию возмущений. Площадь поверхности растекания капли ИЖ превышает соответствующее значение ПФМТС.

Значения геометрических размеров образований, характеризующих процесс взаимодействия капли СВВТ с пленкой того же вещества при ее различных толщинах, представлены в табл. 2.

Увеличение толщины пленки на поверхности приводит к немотонному изменению диаметров образующихся каверны и расположенного поверх нее валика. При этом общая картина взаимодействия не меняется: верхняя поверхность валика остается гладкой и не имеет признаков образования «короны», вторичные капли не возникают. Размеры каверны и валика ИЖ при прочих равных условиях превышают аналогичные показатели ПФМТС, т.е. развитие процесса взаимодействия капли со смоченной поверхностью кремнийорганической жидкости осуществляется на существенно меньшей площади, нежели ионной.

Заключение

Отсутствие гравитации в сочетании с условиями космического вакуума являются факторами, повышающими вероятность появления вторичных капель при работе улавливающего устройства. Вместе с тем, при анализе возможности использования выявленных закономерностей для прогнозирования режимов улавливания в космосе необходимо учитывать отсутствие вторичного каплеобразования в наземных экспериментах с крупными каплями СВВТ. Для таких капель значения чисел Вебера и Рейнольдса достигали соответственно 900 и 510. Значительно меньшим является характерный размер капель в пелене КХИ, он составляет 0,1 мм. При скорости движения капель 2 м/с значения We и Re не превышают соответственно 160 и 56. Учитывая существенное уменьшение величин, определяющих режим соударения капель, можно предположить достижимость устойчивого поддержания режима мягкого (без образования вторичных капель) улавливания пелены в условиях микрогравитации и глубокого вакуума.

Список литературы

1. **Коротеев А.А.** Капельные холодильники-излучатели космических энергетических установок нового поколения. М.: Машиностроение, 2008. 184 с.
2. **Бондарева Н.В., Коротеев А.А., Лебедев А.В., Шелудяков В.Д.** Сверхвысоковакуумные жидкости для открытых космических систем отвода низкопотенциального тепла. // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19, № 3. С. 45–52.
3. **Бондарева Н.В., Коротеев А.А.** О дополнительных уточнениях, касающихся использования методов расчета параметров пелены бескарасных космических излучателей // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 6. С. 166–168.
4. **Коротеев А.А.** Открытые системы отвода низкопотенциального тепла в космосе: основные задачи создания и отработки // Общеросс. научно-техн. журнал «Полет». 2013. № 5. С. 11–19.
5. **Коротеев А.А.** Обобщенные тепловые характеристики капельных холодильников-излучателей низко и среднетемпературного диапазонов // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 4. С. 108–117.
6. **Черникова Е.А., Глухов Л.М., Красовский В.Г., Кустов Л.М., Воробьева М.Г., Коротеев А.А.** Ионные жидкости как теплоносители: сравнение с известными системами, возможные области применения, преимущества и недостатки // Успехи химии. 2015. Т. 84, № 8. С. 875–890.

7. **Борисов В.Т., Черепанов А.Н., Предтеченский М.Р., Варламов Ю.Д.** Влияние смачиваемости на поведение жидкой капли после ее соударения с твердой подложкой // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, № 6. С. 64–69.
8. **Liu J., Vu H., Yoon S.S., Jepsen R., Aguilar G.** Splashing phenomena during liquid Droplet impact // Atomization and Sprays. 2010. Vol. 20, No. 4. P. 297–310.
9. **Macklin W.C., Metaxas G.J.** Splashing of drops on liquid layers // J. of Appl. Phys. 1976. Vol. 47, No. 9. P. 3963–3970.
10. **Коротеев А.А., Нагель Ю.А., Сафронов А.А.** Методы расчета закономерностей функционирования генераторов капель и испарения рабочего тела в открытых космических излучательных системах // Общеросс. научно-техн. журнал «Полет». 2014. № 7. С. 3–9.

Статья поступила в редакцию 29 февраля 2016 г.