

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ КАПЕЛЬНЫХ СТРУЙ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Л.С. Новиков¹, С.А. Бедняков¹, С.В. Зайцев¹, А.А. Маклецов¹, В.Н. Милеев¹,
В.В. Синолиц¹, Н.П. Чирская²

¹ *Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ*

² *Московский государственный университет, физический факультет*

E-mail: novikov@sinp.msu.ru

Одной из возможностей повышения эффективности систем удаления избыточного тепла с космических аппаратов (КА) является использование капельных холодильников-излучателей, в которых отвод тепла осуществляется путем радиационного охлаждения потока монодисперсных капель горячего теплоносителя. Поток капель, формируемый специальным генератором на борту КА, испускается в открытое космическое пространство, а затем улавливается сосудом-коллектором, из которого жидкость вновь поступает в систему охлаждения. На пути от генератора до коллектора, длина которого может достигать нескольких десятков метров, капли излучают избыточное тепло в окружающее пространство [1,2].

Однако при эксплуатации такого холодильника в реальных космических условиях капли теплоносителя могут приобретать электрический заряд за счет тех же физических процессов, которые приводят к электризации КА в космической плазме [3]. Наличие на каплях электрического заряда может вызывать их кулоновское расталкивание и искривление траекторий движения капель, что приведет к неполному собиранию теплоносителя коллектором и в конечном итоге – к нарушению функционирования устройства.

В данной работе приведены результаты расчетных и экспериментальных оценок возможного влияния процессов электризации на движение капель теплоносителя.

Заряд на каплях теплоносителя может формироваться уже при выходе их из генератора, соединенного электрически с общим корпусом КА. Если аппарат заряжен за счет взаимодействия с окружающей плазмой, то заряд капли будет определяться потенциалом КА, конфигурацией формирователя потока капель на выходе генератора и свойствами жидкости, используемой в качестве теплоносителя. Закономерности заряжения капель при выходе их из капилляра, находящегося под высоким потенциалом, и последующего движения капель в электрическом поле исследовались нами ранее в связи с созданием лабораторного макета ускорителя жидких микрочастиц [4].

Последующее взаимодействие капель, испущенных генератором, с космической плазмой может приводить к изменению их исходного заряда или к его появлению, если капли не были заряжены. При рассмотрении этих процессов весьма важным является вопрос о времени заряжения капель при взаимодействии их с космической плазмой, которое зависит от параметров плазмы и размера капель.

При заряджении капли диаметром d в магнитосферной плазме при плотности плазменного тока j_0 до некоторого равновесного потенциала U_{eq} зависимость текущего значения потенциала капли от времени t описывается экспоненциальным законом

$$U(t) = U_{eq} (1 - e^{-t/t_0})$$

с постоянной времени t_0 , определяемой выражением:

$$t_0 = \frac{2U_{eq}}{\pi j_0 d} .$$

Таким образом, капли заряжаются тем быстрее, чем больше плотность плазменного тока и размер капель. При типичной для горячей магнитосферной плазмы плотности тока $\sim 10^{-9}$ А характерное время общего заряджения КА, размеры которых измеряются метрами, составляет $\sim 0,1$ с. Однако для мелких капель это время увеличивается до 100-1000 с, что значительно больше времени пролета в рассматриваемых холодильниках-излучателях. Таким образом, капли могут не успевать зарядиться до равновесного потенциала за время пролета, но и их частичное заряджение может оказывать влияние на траекторию движения.

Вместе с тем достаточно плотную многослойную капельную струю нельзя рассматривать как совокупность отдельных капель, взаимодействующих с плазмой независимо друг от друга. А общие размеры капельной струи близки к размерам КА, т.е. струя в целом должна заряжаться значительно быстрее. Эти упрощенные оценки показывают, что вопрос о временных параметрах заряджения плотного ансамбля частиц требует более глубокого анализа.

Разработанная в НИИЯФ МГУ физико-математическая модель электризации космических аппаратов [5] была применена нами для расчета распределения электрических зарядов в многослойной капельной струе и сил электростатического взаимодействия между отдельными струями, входящими в ее состав. Под последними здесь понимаются струи (цилиндры), диаметр которых равен диаметру капель. Используемая расчетная модель включает в себя 33 диэлектрических цилиндра длиной 1000 мм и радиусом 0,1 мм, один из них расположен в центре цилиндрической системы, а основания остальных 32 цилиндров находятся на концентрических окружностях с радиусами 4, 8, 12 и 16 мм. Расчет был проведен для горячей магнитосферной плазмы со следующими параметрами: $n_1 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-3}$, $T_1 = 0,3 \text{ кэВ}$, $n_2 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-3}$, $T_2 = 3 \dots 10 \text{ кэВ}$ [5]. После расчета распределения потенциалов по поверхности цилиндров определялся заряд каждого из них, а также рассчитывалась сила электростатического отталкивания, действующая на каждый цилиндр вдоль радиуса всей системы цилиндров.

На рис. 1 показана зависимость заряда цилиндра (в относительных единицах) от радиального расстояния от центра модели при различной

температуре горячей компоненты плазмы T_2 . За единицу принят заряд центрального цилиндра, который составляет $3,1 \cdot 10^{-10}$ Кл·мм⁻¹ при $T_2 = 3$ кэВ и $7,0 \cdot 10^{-10}$ Кл·мм⁻¹ при $T_2 = 10$ кэВ.

Очевидно, что увеличение энергии частиц горячей компоненты воздействующей плазмы вызывает соответствующее увеличение заряда центрального цилиндра и всей системы в целом. Кроме того, рост относительного заряда цилиндров в зависимости от расстояния от центра системы более выражен при более высокой энергии плазмы.

Как видно из рис. 1, заряд цилиндров, расположенных на периферии системы (при расстоянии 16 мм от центра) более чем в два раза превышает заряд центрального цилиндра. Это определяется влиянием электрического поля всей заряженной системы на величины плазменных токов, текущих на поверхность каждого из цилиндров в рассматриваемой системе.

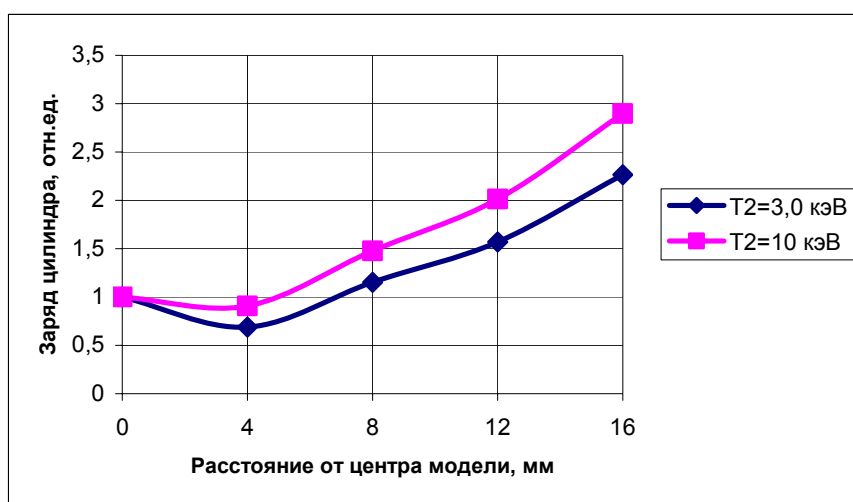


Рис.1. Зависимость заряда цилиндра от расстояния от центра модели

На рис. 2 показана зависимость силы электростатического отталкивания, действующая на каждый цилиндр, от радиального расстояния при двух значениях температуры горячей компоненты плазмы T_2 .

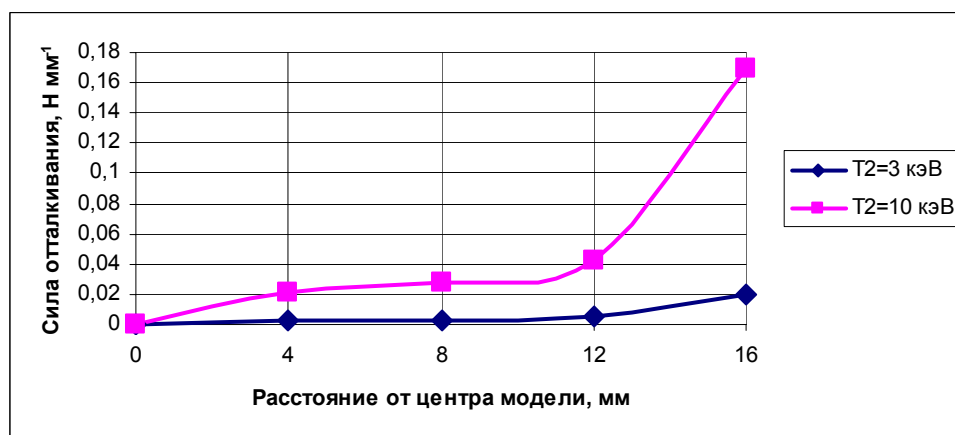


Рис.2. Зависимость силы отталкивания, действующей на цилиндр, от расстояния от центра модели

Из рис. 2 видно, что увеличение температуры горячей компоненты воздействующей плазмы вызывает соответствующее увеличение сил, расталкивающих всю систему цилиндров. Кроме того, увеличение значения электростатической силы отталкивания цилиндров в зависимости от расстояния от центра системы более выражено при более высокой энергии плазмы.

Методика получения струй заряженных жидких капель, описанная в [4], была использована в настоящей работе для экспериментального изучения отклонения струй в поперечном электрическом поле и при их взаимном электростатическом отталкивании. Схема эксперимента в простейшей постановке показана на рис. 3. Положительно заряженные капли, формируемые источником 1, направлялись в отклоняющую систему из двух параллельных пластин 4 и затем попадали на экран, расположенный в нижней части установки. Для исключения взаимного влияния электрических полей источника и отклоняющей системы между ними помещался экран 3, который одновременно выполнял функцию вытягивающего электрода. Расстояние между отклоняющими пластинами, их высота и расстояние от пластин до экрана составляли 70-80 мм.

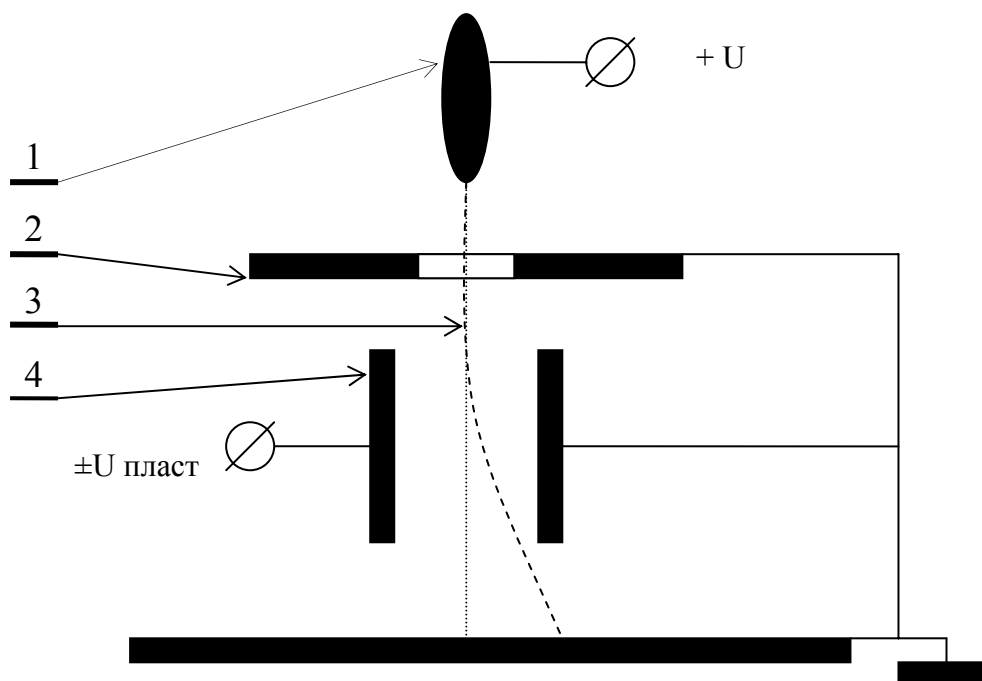


Рис. 3. Схема установки: 1 – источник заряженных капель; 2 – экран; 3 – траектория капель; 4 – отклоняющие пластины

Параметры капель (размер, масса, заряд и скорость на выходе из источника) зависят от приложенного к источнику напряжения $+U$. Поэтому для каждого его значения производилось измерение параметров капель с помощью бесконтактных индукционных датчиков [6]. На рис. 4 приведена полученная зависимость заряда капель от напряжения на источнике. Видно, что значения заряда при фиксированном напряжении имеют достаточно значительный

разброс, но при этом достаточно отчетливо прослеживается закономерность его изменения. В области сравнительно малых значений напряжения (3,5-5,0 кВ) заряд капель снижается с ростом напряжения, что объясняется уменьшением размера капель. Затем в некотором интервале значений напряжения заряд мало меняется, а при напряжениях выше приблизительно 8,0 кВ заряд вновь начинает снижаться из-за перехода источника в режим генерирования мелкодисперсной струи [4].

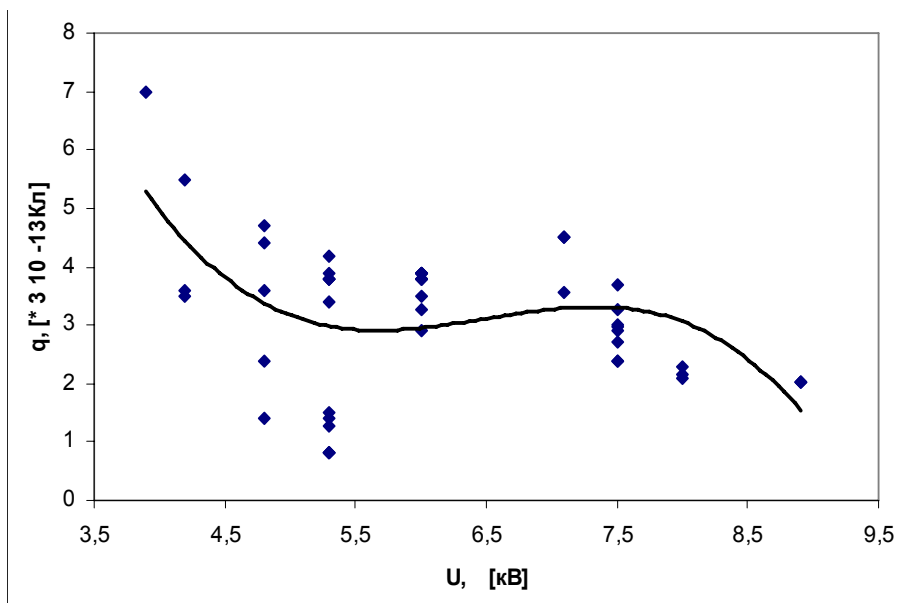


Рис. 4. Зависимость заряда капель q от напряжения на источнике U

Рис. 5 демонстрирует зависимость скорости капель на выходе из источника от приложенного к нему напряжения. Значения скорости при каждом напряжении также имеют существенный разброс, определяемый разбросом зарядов капель.

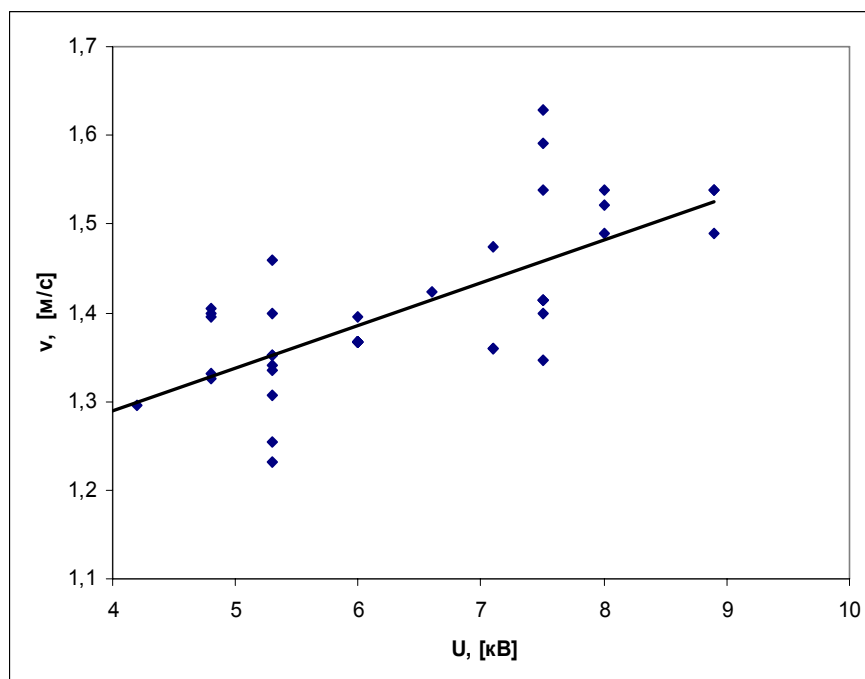


Рис.5 Зависимость скорости капель v от напряжения на источнике U

На рис. 6 представлены измеренные зависимости смещения точки попадания капель на экран от напряжения на отклоняющих пластинах при разных значениях напряжения на источнике. Здесь каждая точка на графиках получена путем усреднения многих событий.

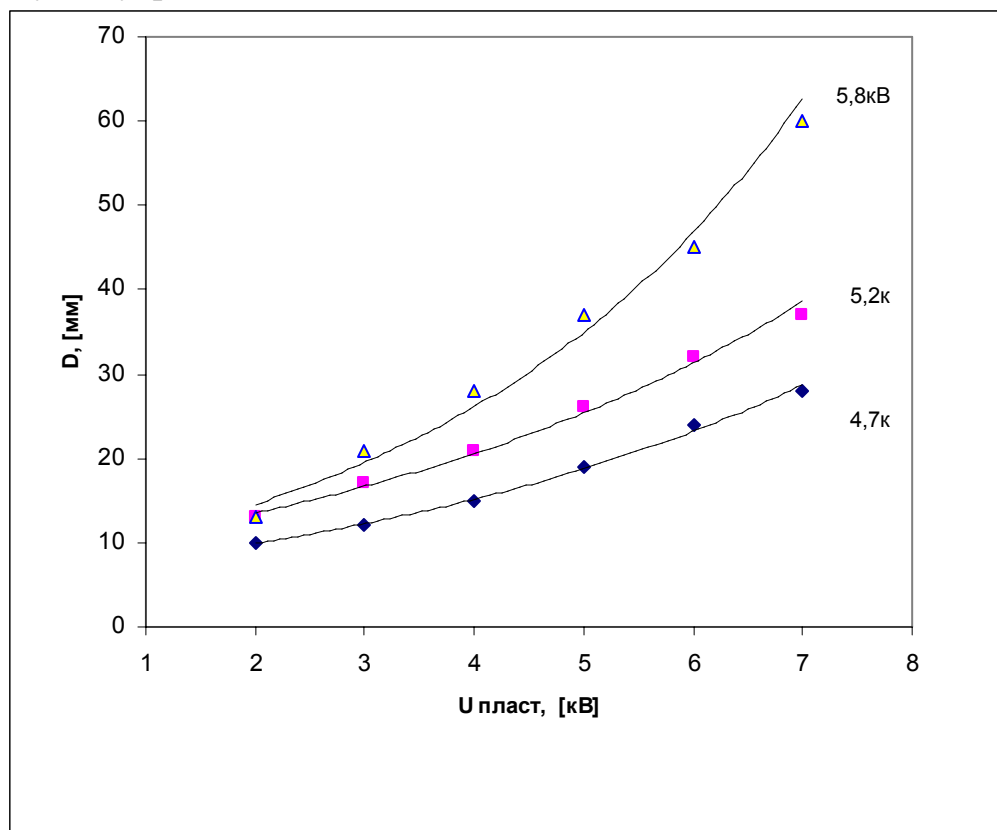


Рис. 6. Зависимость смещения D точки попадания капель на экран от напряжения $U_{\text{пласт}}$ на отклоняющих пластинах при разных значениях напряжения на источнике

Еще один проведенный эксперимент позволил наблюдать взаимное электростатическое отталкивание двух капельных струй. В этом эксперименте два источника, расстояние между которыми составляло несколько миллиметров, формировали две параллельные струи, параметры капель в которых приблизительно соответствовали представленным на рис. 4 и рис. 5. Наблюдалось взаимное отклонение струй от точек падения незаряженных капель. При этом образовывались две овальные зоны соприкосновения заряженных капель с экраном (рис. 7).



Рис. 7. Результат исследования взаимного кулоновского отталкивания двух капельных струй

Расчетные оценки отклонения капель за счет действия электростатических сил хорошо согласуются с результатами обоих описанных экспериментов.

Проведенные исследования показали, что наличие электрического заряда на частицах теплоносителя, используемого в капельных холодильниках – излучателях, может оказывать значительное влияние на работу таких устройств и приводить к нарушению их нормального функционирования. Для более детальной оценки влияния этого фактора необходимо проведение всесторонних теоретических и экспериментальных исследований процессов электризации капельных струй и их движения в условиях космического пространства с учетом конструкционных особенностей аппаратов, оснащаемых подобными устройствами.

1. Mattick A.T., Hertzberg A. Liquid Droplet Radiators for Heat Rejection in Space. Energy to the 21st Century v.1 AIAA, New York, 1980, pp. 143-150.
2. Демянко Ю.Г., Конюхов Г.В., Коротеев А.С., Кузьмин Е.П., Павельев А.А. Ядерные ракетные двигатели, Москва, ООО Норма-Информ, 2001.
3. Новиков Л.С. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой. – М.: Университетская книга, 2006, 120 с.
4. Novikov L.S., Soloviev G.G., Bednyakov S.A., Dzagurov O.B., Shtyrilin A.F., Nadiradze A.B. Electrostatic liquid microparticle accelerator for simulation of high velocity shock impacts in space. In: Proc of the 9th Int. Symp. on Materials in a Space Environment, Noordwijk, The Netherlands, 16–20 June 2003 (ESA SP 540), pp. 543–545.
5. Новиков Л.С., Милеев В.Н., Крупников К.К., Маклецов А.А. Электризация космических аппаратов в магнитосферной плазме. В кн.: Модель космоса. Т.2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Л.С. Новикова. – М.: КДУ, 2007, с. 236–275.
6. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. – М.: Университетская книга, 2009, 104 с.