

УДК 532.529

Экспериментальное исследование влияния числа Онезорге на размеры капель, образовавшихся в результате капиллярного распада струи*

**Н.В. Бондарева¹, А.Л. Григорьев², Т.Г. Коровин², А.А. Коротеев¹,
А.А. Сафронов², Т.Д. Скоробогатько², Н.И. Филатов², А.В. Хлынов²**

¹Московский авиационный институт

²ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва

E-mail: chkt@yandex.ru

Подтверждено соответствие экспериментально полученных результатов проверки теоретически рассчитанной зависимости размеров основных и сателлитных капель от безразмерного волнового числа возмущения поверхности струи ньютоновской жидкости. Показано, что увеличение вязкости жидкости существенно изменяет динамику развития капиллярных волн в струе и механизм образования сателлитных капель.

Ключевые слова: основные и сателлитные капли, капиллярные волны, вынужденный капиллярный распад, безразмерное волновое число.

Введение

Решение новых научно-технических и информационно-телекоммуникационных задач, связанных с использованием космического пространства, предполагает значительное повышение энерговооружённости космических аппаратов. Наиболее проблемной частью их энергетических установок является система отвода тепла. Площадь поверхности, масса и метеоритная уязвимость классических панельных излучателей быстро возрастают при повышении отводимой мощности, а бронирование поверхностей неприемлемо повышает массу конструкции. Выходом из положения представляется использование бескаркасных систем отвода тепла [1]. Идея капельного холодильника-излучателя (КХИ) состоит в радиационном остывании специальным образом сгенерированного свободно распространяющегося в космосе капельного потока сверхвысоковакуумного теплоносителя с последующим улавливанием остывших капель и замыканием контура циркуляции рабочего тела.

Капельный поток формируется методом вынужденного капиллярного распада струй. Рабочая жидкость КХИ должна обладать низкой испаряемостью. Удовлетворяющие этому требованию рабочие тела имеют достаточно высокую вязкость, оказывающую существенное влияние на распад. В работе [2] была теоретически рассчитана зависимость

* Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00045.

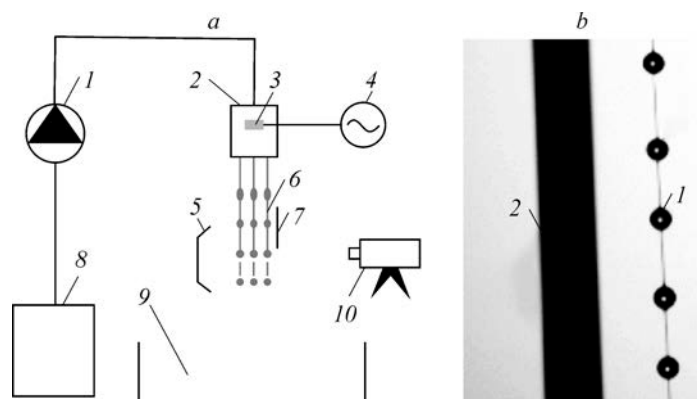


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и фотография распадающейся струи и эталонного цилиндра (b).
 а: 1 — перекачивающий насос, 2 — генератор капель, 3 — пьезоэлемент, 4 — генератор электрических колебаний, 5 — источник рассеянного света, 6 — струи, 7 — эталонный цилиндр, 8 — накопительная емкость, 9 — емкость для сбора рабочего тела, 10 — скоростная видеокамера;
 б: 1 — распадающаяся струя, 2 — эталонный цилиндр.

размеров основных и сателлитных капель от безразмерного волнового числа возмущения поверхности струи ньютоновской жидкости. В представленной работе осуществлена экспериментальная проверка этой зависимости.

Постановка эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1а. Рабочее тело из термостатированной емкости 8 подавалось с помощью перекачивающего насоса 1 в генератор капельного потока 2 и истекало из него через капиллярные отверстия фильеры в виде распадающихся на капли струй 6. Капельный поток собирался в емкость 9. Генерация инициирующих распад возмущений поверхности струи осуществлялась с помощью пьезоэлемента 3, на который подавался сигнал от генератора 4. Под воздействием колебаний пьезоэлемента образовывались акустические волны, проникающие в истекающую струю и изменяющие форму ее поверхности. В результате развития возмущений происходил вынужденный капиллярный распад струй на капли, которые освещались с помощью источника рассеянного света 5 и фиксировались скоростной видеокамерой 10. Вблизи измеряемых объектов помещался металлический цилиндр эталонного размера (рис. 1б). Радиусы распадающейся струи и капель, их скорости, а также длина волны инициирующего распад возмущения λ (рис. 2) измерялись оптическим методом. Систематическая погрешность определения диаметров струй и капель составляла $\sim 0,01$ мм и определялась разрешением объектов при видеосъемке. На основе измерений рассчитывались величины безразмерного волнового числа возмущения $k = 2\pi r_0/\lambda$, где r_0 — радиус невозмущенной струи, а также безразмерный радиус капель $R = r/r_0$.



Рис. 2. Развитие капиллярных возмущений в распадающейся струе.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Диаметр истекающих струй составлял $2r_0 = 0,23 \pm 0,01$ мм и сохранялся неизменным при изменении скорости истечения от 5 до 8 м/с. Толщина фильеры с капиллярными отверстиями составляла 0,25 мм, т.е. при истечении, согласно [3], распределение скорости было близко к однородному. В экспериментах не было обнаружено влияния колебаний пьезоэлемента на радиус истекающих из генератора струй.

Динамическая вязкость μ рабочего тела (вакуумное масло ВМ1-С) в зависимости от температуры (см. рис. 3) измерялась вискозиметром SV-100 с погрешностью не более 2 %.

Эксперименты по диспергированию проводились при температуре рабочего тела 55 °С. Погрешность измерения температуры струй, вызванная неоднородностью прогрева накопительной емкости, различием температур нагретого рабочего тела и трубопроводов и т.д., составляла $\sim 1,5$ °С. Значение числа Онезорге, определяемого соотношением

$$\text{Oh} = \mu / \sqrt{\sigma r_0 \rho}, \quad (1)$$

находилось в диапазоне от 0,5 до 0,7.

Амплитуда подаваемого на пьезоэлемент напряжения составляла 100 В, а частота инициирующего распад сигнала f изменялась от 2 до 7 кГц. Длина нераспавшейся части струи L является медленно изменяющейся функцией частоты. Ее значение изменялось от 7 до 15 см (в случае отсутствия инициирующего распад воздействия оно находилось в диапазоне 15–20 см). Утончение струи, вызванное действием гравитационных сил, не превышало нескольких процентов и не оказывало заметного влияния на капиллярный распад [4]. Длина части струи, в которой происходило утончение перетяжек, соединяющих зародыши капель (см. рис. 2), составляла 2–3 см.

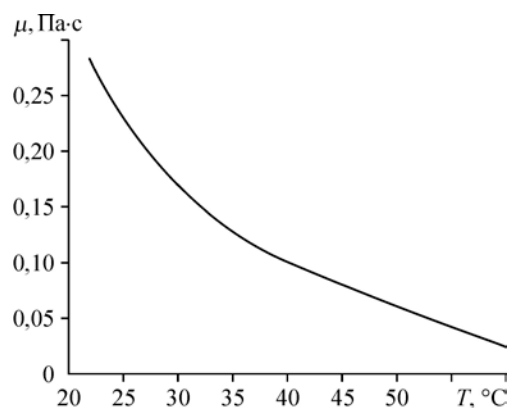
Применяемые в эксперименте средства измерения не позволили определить величину начального возмущения поверхности струи δr вблизи фильеры генератора капель, т.е. ожидаемое значение безразмерной амплитуды инициирующего распад возмущения $\varepsilon = \delta r / r_0 < 0,05$. Расчет с использованием методики, изложенной в работе [2], приводит к значению $\varepsilon \sim 0,025$, что согласуется с экспериментальными результатами.

Эксперименты проводились как в атмосфере, так и в вакуумной камере с остаточным давлением 10 Па. Анализ влияния на распад взаимодействия струи с атмосферой осуществлялся с использованием теории развития капиллярных возмущений, описанной в работе [5], а также экспериментальных результатов [6]. Воздействие атмосферы описывается нелинейной зависимостью от числа Вебера. Пренебречь эффектом возможно, когда

$$\text{We} = \rho_v V^2 d / \sigma < 5,3, \quad (2)$$

где ρ_v — плотность воздуха, V — скорость струи, d — диаметр струи. При большем значении критерия влияние атмосферы на капиллярный распад быстро возрастает. Рассчитанное по формуле (2) значение критической скорости струи для условий эксперимента составляет $V \approx 9$ м/с,

Рис. 3. Зависимость коэффициента динамической вязкости вакуумного масла ВМ1-С от температуры.



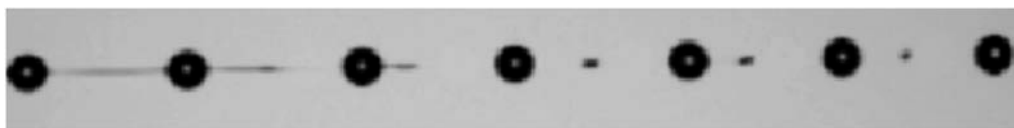


Рис. 4. Распад струи с образованием сателлитных капель при $r_0 = 0,115$ мм, $Oh = 0,6$, $k = 0,32$.

поэтому влияние трения не является существенным. Этот вывод подтверждается также тем, что измеренные как в атмосфере, так и в вакуумной камере зависимости размеров основных и сателлитных капель от безразмерного волнового числа совпадают с точностью до погрешности эксперимента.

На рис. 4 представлена фотография струи жидкости вблизи точки распада. Из-за наличия шумов, обусловленных работой насоса, наблюдались отличия радиусов образовавшихся капель. Для определения величины отклонения измерялись размеры N последовательно образовавшихся капель, а затем на основе экспериментальных данных рассчитывалась функция распределения капель по радиусу R : $\Psi = \Psi(R, N)$. Определение числа капель N , по размерам которых рассчитывалась функция распределения, проводилось путем сравнения функций $\Psi(R, N)$ и $\Psi(R, N/2)$. Если максимальное относительное отклонение

$$\delta\Psi = \sup \left| \frac{\Psi(R, N) - \Psi(R, N/2)}{\Psi(R, N/2)} \right|, \quad (3)$$

где $\sup$ — обозначение супремума величины, не превышало 0,05, то значение N считалось достаточным для расчета функции распределения. Поскольку погрешность измерения размеров частиц в эксперименте была значительно меньше отклонения размеров из-за шумов, погрешность определения радиуса принималась равной полуширине экстремума функции распределения $\Psi(R)$. Характерная величина погрешности составляла $\Delta r \sim 0,02$ мм.

На рис. 5 изображены экспериментально полученные зависимости размеров основных и сателлитных капель от безразмерного волнового числа. Линией обозначена зависимость, теоретически рассчитанная в работе [2]. Наблюдается хорошее совпадение результатов. В то же время в экспериментах обнаружено появление микросателлитов, образовавшихся вследствие развития гидродинамических неустойчивостей в области тонкого перешейка, соединяющего зародыши капель [7]. Дополнительно осуществлено сравнение результатов эксперимента с «невязкой» теорией, разработанной и экспериментально проверенной в работе [8]. Анализ результатов позволяет сделать вывод о невозможности

применимости изложенных в [8] подходов для описания капиллярного распада при значениях числа Онезорге, близких к единице.

В работе [2] было отмечено, что при $Oh < 0,5$ вторая производная функции, описывающей размеры сателлитных капель, отрицательна. В противном случае ее величина положительна. Результаты проведенных экспериментов подтверждают этот вывод.

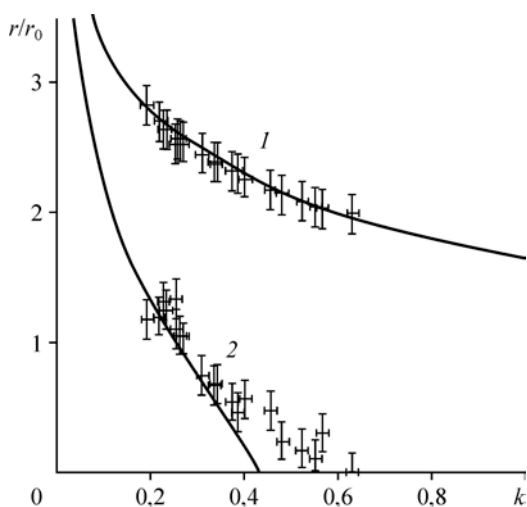


Рис. 5. Зависимости безразмерного радиуса основных (1) и сателлитных (2) капель от волнового числа.

Линии — теоретический расчет для $Oh = 0,6$; символы — данные эксперимента при $Oh = 0,6 \pm 0,1$.

Заключение

Экспериментально исследовано влияние числа Онезорге на вынужденный капиллярный распад струй. Проведено измерение размеров основных и сателлитных капель, подтверждено соответствие полученных результатов с теоретическими данными работы [2]. Показано, что увеличение вязкости жидкости существенно изменяет динамику развития капиллярных волн в струе и механизм образования сателлитных капель. В невязкой жидкости сателлиты образуются в результате возникновения нелинейных эффектов эволюции инициирующего распад возмущения. При значениях числа Онезорге, приблизительно равных единице, они появляются из-за развития гидродинамических неустойчивостей капиллярного течения в тонкой перетяжке, соединяющей зародыши основных капель.

Список литературы

1. Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Влияние структуры капельной пленки на мощность бескаркасных космических излучателей и эффективность энергетических установок // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54, № 5. С. 817–820.
2. Сафронов А.А. Особенности капиллярного распада струй жидкости при числах Онезорге больше единицы // Инж.-физ. журнал. 2017. Т. 90, № 1. С. 176–185.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 743 с.
4. Маркова М.П., Шкадов В.Я. О нелинейном развитии капиллярных волн в струе вязкой жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1972. № 3. С. 30–38.
5. Gordillo J.M., Perez-Saborid M. Aerodynamic effects in the break-up of liquid jets: on the first wind-induced break-up regime // J. Fluid Mech. 2005. Vol. 541. P. 1–20.
6. Fenn III R.W., Middleman S. Newtonian jet stability: the role of air resistance // A.I.Ch.E. J. 1969. Vol. 15, No. 3. P. 379–383.
7. Григорьев А.Л., Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Автономные закономерности образования микросателлитов в процессе капиллярного распада вязких струй // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 4. С. 599–609.
8. Lafrance P. Nonlinear breakup of a laminar liquid jet // Phys. Fluids. 1975. Vol. 18, No. 4. P. 428–432.

*Статья поступила в редакцию 2 апреля 2019 г.,
после доработки — 25 апреля 2019 г.,
принята к публикации 4 июня 2019 г.*