

## ПОЛУЧЕНИЕ МОНОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

### АННОТАЦИЯ

Для решения проблем охлаждения массивных энергетических установок необходимы высокоэффективные теплообменники, обладающие малой собственной массой. Наиболее перспективными являются теплообменники, в работе которых используются потоки монодисперсных капель. Для изучения процессов получения монодисперсных потоков была создана специальная экспериментальная установка (модель капельного холодильника-излучателя (КХИ)). В данной работе дано описание системы экспериментальной установки и приведены результаты тестовых экспериментов по изучению влияния вязкости рабочей жидкости на основные характеристики монодисперсного распада.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения проблем охлаждения массивных энергетических установок необходимы высокоэффективные теплообменники, обладающие малой собственной массой. Наиболее перспективными являются теплообменники, в работе которых используются потоки монодисперсных капель. Такие теплообменники получили название капельных холодильников-излучателей (КХИ) [1—4].

Капельный холодильник-излучатель работает следующим образом. Нагретый от энергетической установки теплоноситель поступает в генератор, который формирует поток одинаковых монодисперсных капель. Двигаясь в пространстве между генератором и сборником, поток за счёт излучения уменьшает свою температуру и попадает в сборник капель.

По сравнению с теплообменниками традиционных типов КХИ обладает следующими преимуществами: полной метеоритной защищенностью, отсутствием потерь теплоносителя, малыми габаритно-весовыми характеристиками.

В качестве теплоносителя в КХИ используются жидкости с большим коэффициентом излучения и малой испаряемостью в вакууме.

Для изучения процессов получения монодисперсных потоков из таких жидкостей была создана специальная экспериментальная установка (модель капельного холодильника-излучателя).

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка состоит из следующих частей: вакуумной камеры, системы откачки и системы получения монодисперсных потоков. Блок схема и расположение отдельных систем установки представлены на рис. 1.

Основу экспериментальной установки составляет вакуумная камера ВК. Она состоит из четырех цилиндрических обечаек, изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и скрепленных фланцами. Каждая обечайка содержит по четыре съемных иллюминатора, предназначенных для наблюдения за процессами, происходящими внутри вакуумной камеры. К верхнему фланцу вакуумной камеры крепится генератор монодисперсных потоков Г, а к нижнему — вакуумный затвор ВЗТ типа 23ВЭ-160, отделяющий вакуумную камеру от сборника жидкости (СЖ).

В систему откачки вакуумной камеры входят два ротационных вакуумных насоса ВН1 и ВН2. Для их подключения к камере используется вакуумная арматура: клапаны с дистанционным управлением (К1 – К7) и ручные вентили (В1 – В4). Для контроля давления используется вакуумметр типа ВИТ-2 с датчиками давления ВЛ1 – ВЛ3.

В систему получения монодисперсных потоков входят: рабочая емкость Р, вспомогательная ёмкость (ВЕ) с насосом для перекачки Н, термостат Т с оборудованием подогрева жидкости, фильтр Ф, генератор капель Г, клапаны с дистанционным управлением (К4 – К7) и ручной вентиль В5. Избыточное давление в системе создаётся с помощью: газового баллона Б с системой редукторов (РД1 и РД2) и рабочая емкость Р. Для контроля давления используются манометры М1–М3. Под действием избыточного давления рабочая жидкость поступает из ёмкости Р для предварительного нагрева сначала в термостат Т, а затем в генератор капель Г. Диаметр струи определяется диаметром выходного отверстия генератора капель. Из генератора тонкая капиллярная струя поступает в вакуумную камеру. Скорость струи можно менять, изменяя избыточное давление. Под действием внешнего возмущения струя распадается на капли. Амплитуда и частота внешнего возмущения задаются с помощью пьезоэлемента и генератора ГЗ-56/1. Пройдя через вакуумную камеру капли, собираются в сборнике жидкости. Для обеспечения непрерывной работы установки сборник жидкости периодически отсекается от вакуумной камеры вакуумным затвором (ВЗТ). Затем в сборнике повышается давление, и рабочая жидкость перетекает из сборника во вспомогательную ёмкость. Из вспомогательной ёмкости с помощью насоса Н жидкость используется для пополнения рабочей емкости Р.

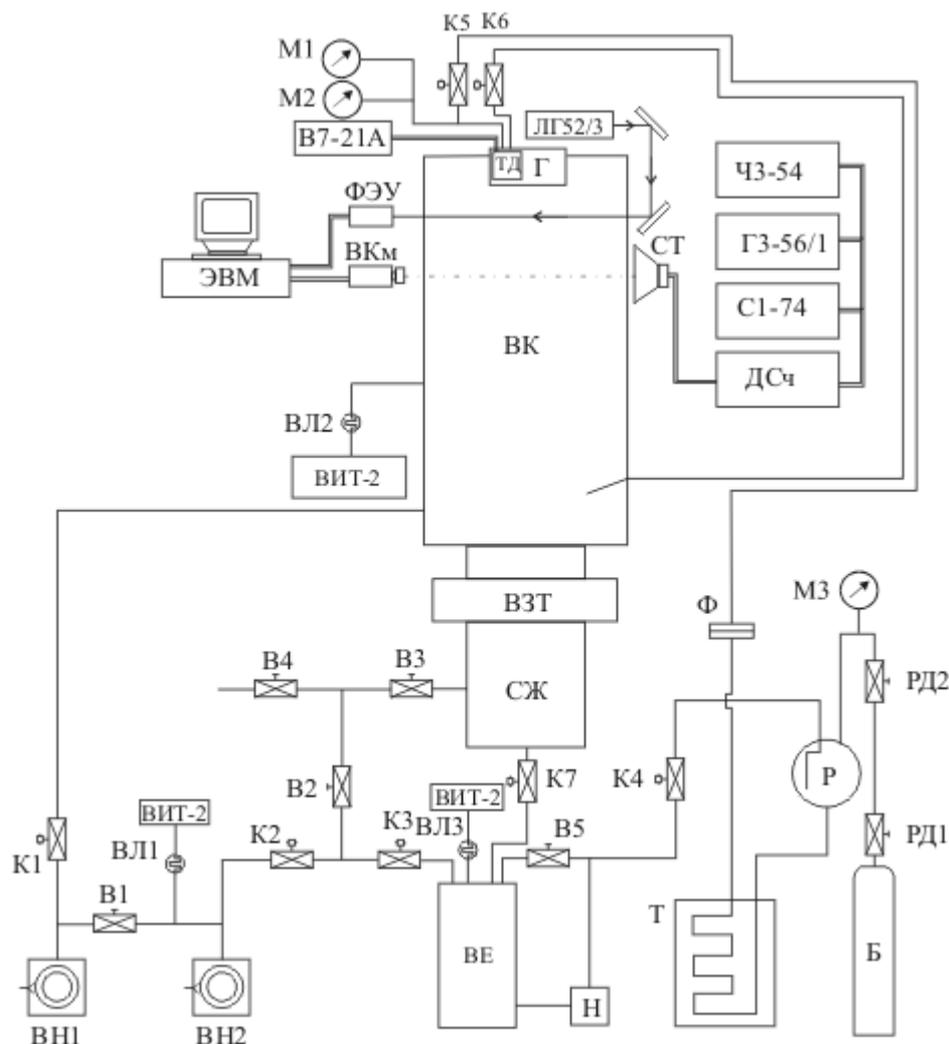


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

Б — баллон, ВЗТ — вакуумный затвор, ВК — вакуумная камера, Г — генератор монодисперсных частиц, Н — насос, ВЕ — вспомогательная емкость, Р — рабочая емкость, СЖ — сборник жидкости, Т — термостат, Ф — фильтр, В1 – В4 — ручные вентили, ВИТ-2 — вакуумметр, ВЛ1 – ВЛ3 — манометрические преобразователи (вакуумные лампы), ВН1, ВН2 — вакуумные насосы, К1 – К7 — электромагнитные вакуумные клапаны, М1 – М3 — стрелочные манометры, РД1 и РД2 — редукторы грубой и точной регулировки соответственно

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

На описанной выше установке был проведен ряд тестовых экспериментов по изучению влияния вязкости рабочей жидкости на основные характеристики монодисперсного распада. Эксперименты проводились со струями разного диаметра и разной скорости. В качестве рабочей жидкости использовалось вакуумное масло VM1. Изменение вязкости достигалось с помощью дополнительного нагрева рабочей жидкости в термостате. Для контроля характеристик монодисперсного распада и характеристик рабочей жидкости использовалась специальная измерительная система. Элементы системы приведены на рис. 1. Температура рабочей жидкости контролировалась с помощью термометра сопротивления ТД и ампервольтметра типа В7-21А. Для контроля характеристик монодисперсного распада и характеристик рабочей жидкости использовалось следующее оборудование строботажометр СТ-МЭИ

и цифровая телекамера ВКм фирмы Sony марки VHT VC45BSHRX-12.

Строботажометр подсвечивал струю и капли короткими световыми импульсами (длительность импульса порядка 1 мкс). Для запуска строботажометра использовался сигнал от генератора ГЗ-56/1 и делителя ДСч с частотой, синхронной частоте сигнала, подаваемого на генератор капель. Цифровая телекамера использовалась не только для фиксации процессов, происходящих при образовании капель, но и для определения: скорости и размера капель. Для этого изображение с цифровой камеры сначала записывалось в память ЭВМ, а затем обрабатывалось с помощью специальной программы. Для определения длины нераспавшейся части струи использовался лазер ЛГ 52/3 и фотоумножитель ФЭУ с системой зеркал. С помощью системы зеркал лазерный луч перемещался вдоль струи, и с помощью ФЭУ определялась интенсивность прошедшего

света. Положение лазерного луча, при котором интенсивность становилась максимальной, соответствовало точке распада струи на капли [7].

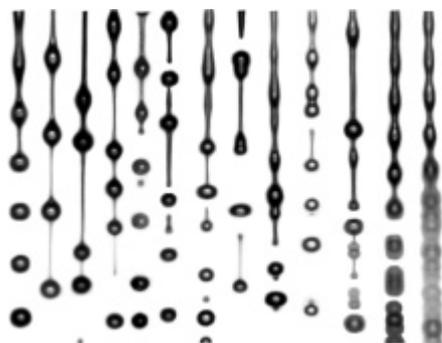


Рис. 2. Поведение струи вблизи точки распада

Тестовые эксперименты показали, что распад вакуумного масла может быть похож на распад невязкой жидкости (рис. 2.1), а может происходить с образованием перешейков (рис. 2.2). Наряду с режимом монодисперсного распада (рис. 2: 1 и 2) существуют и более сложные режимы: режимы распада струй с разным расстоянием между каплями одинакового размера (рис. 2: 3, 4, 5), режимы монодисперсного распада с образованием капель-сателлитов (рис. 2: 6, 7, 8), а также режимы, в которых проявляются эффекты нелинейного характера (рис. 2: 9, 10, 11).

Кроме того, существуют режимы, в которых капли при монодисперсном распаде колеблются с частотой, отличающейся от частоты колебаний, распространяющихся по поверхности струи (рис. 2: 12, 13). В экспериментах по определению влияния вязкости на длину нераспавшейся части измерения проводились со струями разного диаметра, разной скоростью, при разных частотах внешнего возбуждения и разной вязкости рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости использовалось вакуумное масло ВМ1. Изменение вязкости достигалось с помощью дополнительного нагрева рабочей жидкости в термостате.

Для подробного исследования роста волны возмущения использовалась следующая методика. С помощью системы контроля каплеобразования фиксировался процесс распада струи на капли. Изображение процесса распада оцифровывалось и запоминалось в памяти ЭВМ. С помощью специального программного обеспечения изображение анализировалось, и определялась амплитуда волны в разных точках вдоль струи. Полученные значения амплитуд использовались для нахождения уравнения аппроксимационной кривой. В качестве примера на рис. 3 приведены фотографии распадов, полученных в одном из экспериментов, при следующих параметрах: температура жидкости 90.1 °С, частота внешнего возмущения 1386 Гц, диаметр струи 400 мкм, скорость струи менялась от 1.90 до 6.82 м/с.

Соответствующие этим режимам распада значения амплитуд волн возмущения в разных точках вдоль струи при разных скоростях струй и кривые, их аппроксимирующие, приведены на рис. 4. Результаты расчёта роста амплитуды возмущения вдоль струи, для минимальной и максимальной скоростей струй, по теории Релея [5] и модели Вебера [2,6] при тех же внешних параметрах представлены на рис. 5. При расчётах использовалось значение величины начального возмущения  $\delta_0 = 0.65 \cdot 10^{-6}$  м, полученное в результате аппроксимации экспериментальных результатов. Для сравнения на рис. 5 также представлены аппроксимационные кривые роста амплитуды возмущения вдоль струи для экспериментов с минимальной и максимальной скоростями распада.

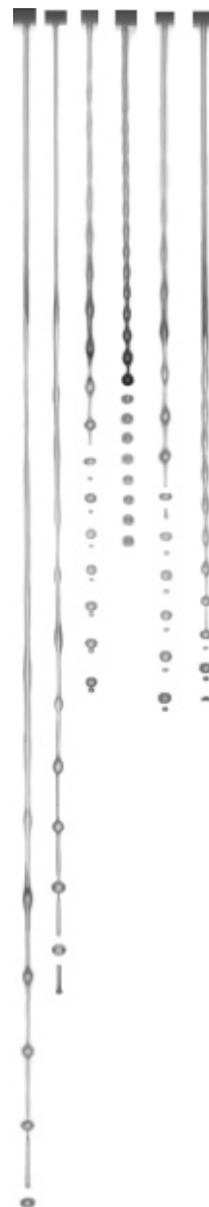


Рис. 3. Экспериментально зафиксированные варианты распада струи на капли при следующих параметрах: температура жидкости 90.1 °С, частота внешнего возмущения 1386 Гц, диаметр струи 400 мкм, скорость струи менялась от 6.82 до 1.90 м/с

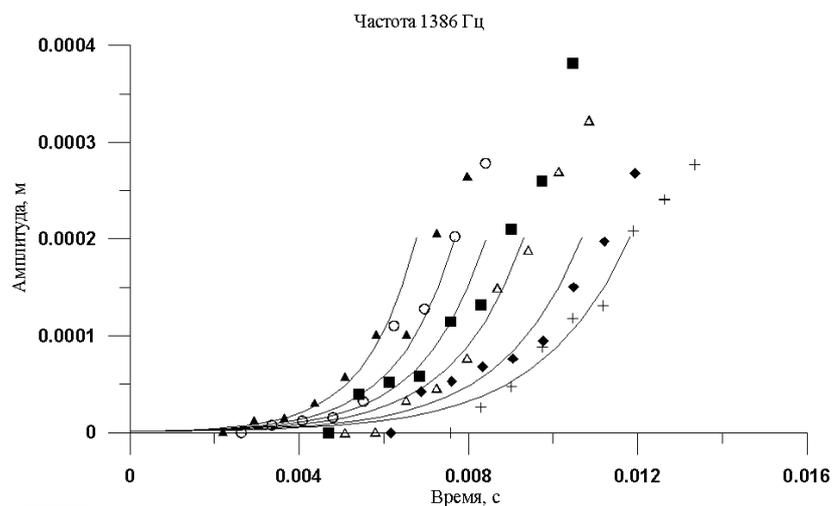


Рис. 4. Значения амплитуд волн возмущения в разных точках вдоль струи при разных скоростях струй:  
 $\Delta$  — 1.90 м/с;  $\blacksquare$  — 2.92 м/с;  $\blacktriangle$  — 3.18 м/с;  $\circ$  — 3.70 м/с;  $\blacklozenge$  — 5.54 м/с;  $+$  — 6.82 м/с (аппроксимационные кривые)

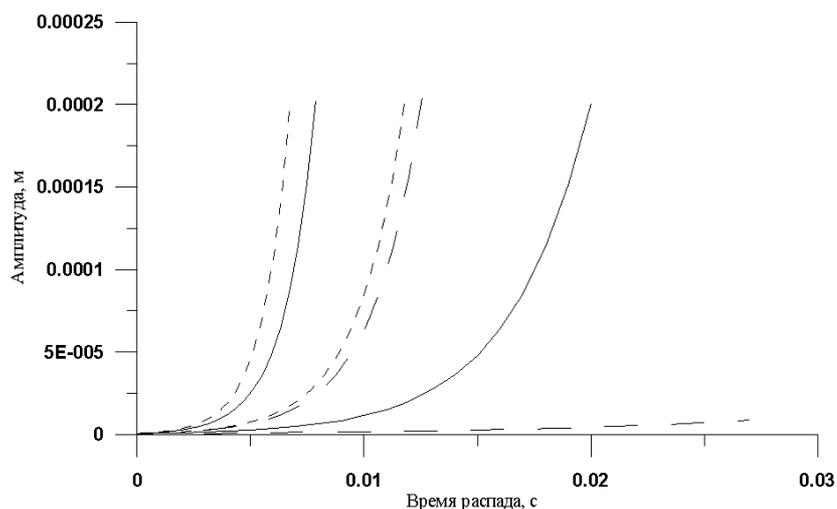


Рис. 5. Результаты расчёта роста амплитуды возмущения вдоль струи для минимальной и максимальной скоростей струй:

— эксперимент; - - модель Релея; — — модель Вебера

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о не соответствии полученных экспериментальных результатов с существующим теоретическим описанием процесса распада вязких жидкостей. Из экспериментов видно, что существуют несколько процессов, приводящих к распаду струй вязких жидкостей. Первый связан с ростом волны вдоль струи и оканчивается при достижении волной амплитуды равной радиусу струи. Второй процесс связан с наличием в вязких жидкостях сил, препятствующих распаду струи на капли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Монодиспергирование вещества: принципы и применение** / Е.В. Аметистов, В.В. Блаженков, А.К. Городов и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 160—168.

2. **Аметистов Е.В., Дмитриев А.С.** Монодисперсные системы и технологии // М: Издательство МЭИ, 2003.
3. **Shlomo L. Pfeiffer.** Conceptual Design of Liquid Droplet Radiator Shuttle-Attached Experiment // Final report. NASA Contractor Report 187067, October 1989.
4. **Electrostatic** charging and deflection of nonconventional droplet streams formed from capillary stream breakup / Melissa Orme, Jon Courter, Quingbin Liu Changzheng Huang and Robert Smith. Physics of fluids. Vol. 12, number 9. September 2000
5. **Рэлей Дж.В.** Теория звука. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. Т. 2.
6. **Weber C.** Zum den Zerfall eines Flüssigkeitstrahles// Z. angew. Math. Mech. 1931/ Bd 11. H. 3. S. 136—154.
7. **Бухаров А.В.** Получение потоков заряженных монодисперсных капель из проводящих жидкостей: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1993.