

Ширяева С.О.
Григорьев А.И.
Волкова М.В.

Спонтанный капиллярный распад заряженных струй



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

С.О. Ширяева, А.И. Григорьев, М.В. Волкова

Спонтанный капиллярный распад заряженных струй

Ярославль 2007

УДК 532.5:537.1:541.037:621.319.7:66.069.83
ББК 253.313
Г 83

*Рекомендовано
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2007 года*

Рецензенты:

кафедра прикладной математики и вычислительной техники
Ярославского государственного технического университета;
д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. Коромыслов

Ширяева, С.О. Спонтанный капиллярный распад заряженных
Г 83 струй: моногр. / С.О. Ширяева, А.И. Григорьев, М.В. Волкова; Яросл.
гос. ун-т. – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – 320 с.
ISBN

В монографии в рамках аналитического асимптотического подхода исследуются общезфизические закономерности линейного и нелинейного волнового движения на поверхности заряженных струй как идеальной, так и вязкой жидкости и условия дробления струй на отдельные капли. Рассмотрены особенности спонтанного электростатического полидиспергирования жидкости, имеющего место при распаде на капли заряженных струй жидкости, выбрасываемых при реализации неустойчивости заряженной как плоской, так и криволинейной свободной поверхностью жидкости. Проведено теоретическое обоснование предлагаемой классификации экспериментально наблюдающихся режимов электростатического полидиспергирования жидкости.

Предназначена для специалистов в области электрогидродинамики, докторантов, аспирантов и студентов старших курсов университетов.

При написании книги авторы пользовались поддержкой грантов РФФИ № 05-08-01147-а и №06-01-00066-а.

УДК 532.5:537.1:541.037:621.319.7:66.069.83
ББК 253.313

© Ярославский государственный
университет, 2007

© С.О. Ширяева, А.И. Григорьев,
М.В. Волкова. О. Ширяева, 2007

$R = \rho = \gamma = 1$. В задачах об устойчивости плоского мениска безразмеривание проводится на основе соотношений $g = \rho = \gamma = 1$.

Введение

Явлению неустойчивости заряженной поверхности жидкости, приводящему к выбросу на нелинейной стадии реализации феномена неустойчивой поверхностью сильно заряженных струй, распадающихся полидисперсным образом на отдельные капли, посвящено весьма большое количество экспериментальных и теоретических исследований в связи с многочисленными академическими, техническими и технологическими приложениями (см., например, обзоры и монографии [1-12]), в которых проанализировано состояние исследований в различных сферах использования обсуждаемого явления). Следует обратить внимание на широкое практическое использование феномена при получении порошков тугоплавких металлов, в химической технологии при распылении ядохимикатов и лакокрасочных материалов, горючего в реактивных двигателях в реактивной космической технике, электрокаплеструйной печати. Этот феномен также связан с разработкой новых средств масс-спектрометрического анализа нелетучих и термически нестабильных жидкостей.

Несмотря на обилие теоретических и экспериментальных работ по изучению неустойчивости движущейся струи жидкости и феномена дробления ее на отдельные капли, многое в физике происходящих процессов остается до сих пор не выясненным и по-прежнему привлекает внимание исследователей. Сказанное, в частности, относится к анализу физических закономерностей: полидисперсного электростатического распада струи, имеющей конечную длину, свободный конец которой может совершать «хлыстообразное» движение [13 – 18]. Тем не менее, феномен полидисперсного распада на капли неосесимметричных струй, выбрасываемых с вершин свободно падающих капель [10] и менисков жидкости на торцах капилляров [13 – 17], при реализации их неустойчивости по отношению к поверхностному заряду известен давно [10, 23 – 26]. Он широко используется в самых разнообразных направлениях техники и технологии [1 – 12], но в основе практиче-

ского использования явления электростатического диспергирования жидкости лежат лишь феноменологически осмысленные результаты чисто экспериментальных исследований и малая трудоемкость его воспроизводства.

В экспериментальных исследованиях конца предыдущего столетия было обнаружено около десятка различных режимов электродиспергирования жидкости [17], сведенных на основе наблюдаемой феноменологии в систему в работах [27 – 29], а позднее на том же полуфеноменологическом уровне в [30 – 31]. Но для проводимого рассмотрения важно, что во всех экспериментальных работах имел место выброс с заряженной поверхности жидкости заряженных же струй, распадающихся на отдельные капли. Следует отметить, что в последние двадцать лет регулярно проводятся международные симпозиумы по электродиспергированию жидкости, собирающие сотни докладов, посвященных этому феномену. И хотя подавляющее большинство работ носят экспериментальный характер и посвящены в основном особенностям электродиспергирования конкретных жидкостей в конкретных установках и устройствах, тем не менее общее количество публикаций по обсуждаемой теме исчисляется тысячами и насущной проблемой является построение общей теории электродиспергирования (дробления заряженной струи с формой, отличной от цилиндрической, на капли) с учетом реальных физико-химических характеристик жидкостей и многообразия релаксационных эффектов.

Уже в текущем столетии было выполнено несколько теоретических аналитических работ по исследованию устойчивости заряженных струй относительно произвольных неосесимметричных возмущений [32 – 34]. Но наиболее интересные на момент издания данной книги работы, выполненные в последние несколько десятилетий, ориентированы на исследование нелинейных эффектов, связанных с осцилляциями струй и дроблением их на капли (см., например, [35 – 50] и указанную там литературу). Однако лишь пять последних из перечисленных работ относятся к нелинейным осцилляциям заряженной струи, остальные рассматривают нелинейные проблемы осцилляций и дробления незаряженных струй, что, безусловно важно, поскольку многие проблемы нелинейной устойчивости заряженных и незаряженных струй одинаковы и пока

в этом вопросе исследователи находятся на стадии накопления экспериментальных и теоретических данных.

В настоящей книге делается попытка теоретического обоснования полуфеноменологической классификации наблюдаемых режимов спонтанного полидиспергирования заряженных струй жидкости, предложенной в [27 – 29].

1. Классификация режимов спонтанного электродиспергирования жидкости

1.1. Ретроспектива исследований по классификации режимов электродиспергирования

Повышенный интерес со стороны исследователей к явлению электродиспергирования жидкости (электродиспергированию жидкости), не угасающий уже в течение нескольких десятилетий (см., например, обзоры [1-12] и указанную там литературу), обусловлен, прежде всего, возможностью многочисленных технических использований этого процесса, а также возможностью более точного регулирования параметров получаемого аэрозоля и компактностью необходимого оборудования в сравнении с имеющимися механическими и пневматическими способами распыления. Большая часть исследований, посвященных электродиспергированию, является экспериментальной. Одним из наиболее очевидных выводов, к которому приводит даже поверхностное знакомство с проведенными экспериментами, является вывод о высокой чувствительности обсуждаемого феномена к физическим свойствам рабочей жидкости, особенностям экспериментальной установки и таким характеристикам процесса, как давление жидкости в капилляре и потенциал. В зависимости от величины и соотношения этих параметров можно выделить несколько режимов процесса распыления, сильно различающихся как внешним видом, так и характеристиками формирующегося капельного аэрозоля (спектрами размеров, зарядов и удельных зарядов капель).

Оглавление

1. Размерность.....	Ошибка! Закладка не определена.
2. Системы единиц физических величин .	Ошибка! Закладка не определена.
3. Основные и производные единицы.....	Ошибка! Закладка не определена.
4. Метод размерностей	Ошибка! Закладка не определена.
5. Использование метода размерностей ...	Ошибка! Закладка не определена.
5.1. Ситуация $N - K = 2$. Векторные единицы длины....	Ошибка! Закладка не определена.
5.2. Ситуация $N - K = 2$. Двойственный характер понятия массы	Ошибка! Закладка не определена.
5.3. Ситуация $N - K = 0$	Ошибка! Закладка не определена.
6. Оценки значений физических величин методом размерности .	Ошибка! Закладка не определена.
7. Обезразмеривание.....	Ошибка! Закладка не определена.
8. Анализ размерностей. π -теорема	Ошибка! Закладка не определена.
9. Физические единицы.....	Ошибка! Закладка не определена.
9.1. Системы единиц физических величин	Ошибка! Закладка не определена.
9.2. Построение систем единиц.....	Ошибка! Закладка не определена.
9.3. Измерения	Ошибка! Закладка не определена.
9.4. Переход от одной системы единиц к другой.....	Ошибка! Закладка не определена.
Приложения	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 1. Механические свойства твердых тел... ..	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 2. Задачи.....	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 3. Размерности и единицы измерения некоторых геометрических и механических величин в системах единиц СИ и СГС	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 4. Единицы измерения тепловых величин..	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 5. Единицы измерения электрических величин	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 6. Единицы измерения магнитных величин	Ошибка! Закладка не определена.
Литература	Ошибка! Закладка не определена.

Учебное издание

Ширяева Светлана Олеговна
Григорьев Александр Иванович
Волкова Марина Владимировна

Спонтанный капиллярный распад заряженных струй