

Министерство образования Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

**С. О. Ширяева**  
**А. И. Григорьев**

# **Спонтанный распад струй**

*Монография*

Ярославль 2011

УДК 532.5:537.1:541.037:621.319.7:66.069.83  
ББК 253.13  
Ш 64

*Рекомендовано  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве научного издания. План 2011 года*

Рецензенты:

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

**Ширяева, С. О. Спонтанный распад струй:** монография  
Г 83 / С. О. Ширяева, А. И. Григорьев; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Де-  
мидова. – Ярославль: ЯрГУ, 2011. – 204 с.  
ISBN 978-5-8397-0849-5

В монографии в рамках аналитического асимптотического подхода исследуются общефизические закономерности линейного волнового движения на поверхности струй идеальной и вязкой жидкости и условия дробления струй на отдельные капли. Рассмотрены особенности спонтанного электростатического полидиспергирования жидкости, имеющего место при распаде на капли 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.

*При написании книги авторы пользовались частичной поддержкой грантов РФФИ № 09-01-00084 и № 09-08-00148 и Рособрнауки №РНП 2.1.1.13776*

УДК 532.5:537.1:541.037:621.319.7:66.069.83  
ББК 253.13

ISBN 978-5-8397-0849-5

© Ярославский государственный  
университет им. П. Г. Демидова, 2011

# 1. Введение. Ретроспектива исследований устойчивости и спонтанного капиллярного распада заряженных струй

В самых различных академических, технических и технологических приложениях приходится сталкиваться с сильно заряженной свободной поверхностью жидкости или границей раздела несмешивающихся сред, которые можно моделировать несжимаемыми жидкостями. Когда отрицательное электростатическое давление на свободную поверхность жидкости (или границу раздела несмешивающихся сред), возмущенную капиллярным волновым движением теплового происхождения, превысит локальное значение давления капиллярных сил, с поверхности жидкости выбрасывается заряженная струйка жидкости, распадающаяся полидисперсным образом на отдельные капли [1–5]. Весь феномен носит название спонтанного электродиспергирования жидкости в противовес вынужденному капиллярному распаду струй, ориентированному на получение потоков монодисперсных заряженных капель [6].

Капиллярные волны теплового происхождения генерируются тепловым движением молекул жидкости и имеют амплитуды  $\sim \sqrt{kT/\gamma}$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура жидкости,  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения. Для большинства жидкостей эти амплитуды не превышают одной десятой нанометра. Такие волны в задачах гидродинамики обычно именуется волнами бесконечно малой амплитуды.

Под электростатическим полем будет пониматься электрическое поле, являющееся решением уравнения Пуассона (или Лапласа), изменяющееся во времени со скоростью много меньшей скорости распространения электромагнитной волны. Электрические поля, возникающие вблизи заряженной поверхности жидкости, возмущенной капиллярным волновым движением, изменяются во времени со скоростями, не превышающими скорости звука в жидкости, а потому эффектами запаздывания

можно пренебрегать и считать их в проводимом рассмотрении электростатическими.

С феноменом спонтанного электродиспергирования жидкости приходится сталкиваться: в точном приборостроении при анализе физических закономерностей функционирования жидко-металлических источников ионов [7–10] и масс-спектрометров для анализа нелетучих, органических и термически нестабильных веществ [11, 12]; при распыливании горючего, ядохимикатов, лакокрасочных материалов [13–15]; в устройствах для получения порошков тугоплавких металлов [16]; в жидкометаллической эпитаксии и литографии [16]; ионных коллоидных реактивных двигателях [14, 15]; при получении капель жидкого водорода для установок термоядерного синтеза [18]; в связи с исследованием физических механизмов инициирования разряда молнии [19–22], зажигания огней св. Эльма [23, 24], электрических явлений в воронке смерча [25].

В связи с многочисленными приложениями феномена электродиспергирования жидкости, разнообразием установок, физико-химических свойств рабочих жидкостей и экспериментально выделенных режимов количество публикаций с описаниями феноменологии явления измеряется тысячами. Но теоретическое осмысление всего многообразия экспериментальных данных пока не завершено в силу нелинейности и сложности феномена, а также в силу «рыхлости» экспериментального материала. Говоря о «рыхлости», мы имеем в виду то обстоятельство, что экспериментальные результаты, полученные на различных установках, не всегда согласуются друг с другом; описания проведенных экспериментов весьма редко сопровождаются контролем физико-химических свойств рабочих жидкостей и погрешностями измерений. Результаты теоретических исследований, выполненных в различных техниках, идеализированных моделях и порядках приближений, оставляют ощутимые пробелы в системе представлений о физических механизмах электродиспергирования жидкости.

В связи со сказанным в настоящем анализе будет сделана попытка обобщения накопленных к настоящему времени теоретических представлений об обсуждаемом феномене.

# Оглавление

1. Введение. Ретроспектива исследований устойчивости и спонтанного капиллярного распада заряженных струй.....	3
2. Линейные осцилляции и капиллярный распад заряженных жидких струй.....	61
2.1. Линейные осцилляции и распад незаряженной цилиндрической струи идеальной жидкости.....	66
2.2. Линейные осесимметричные осцилляции и распад незаряженной цилиндрической струи вязкой жидкости.....	72
2.3. Линейные неосесимметричные осцилляции и распад заряженной цилиндрической струи.....	82
2.4. Линейные неосесимметричные осцилляции объемно заряженной цилиндрической струи вязкой диэлектрической жидкости.....	103
3. Об устойчивости капиллярных волн на поверхности заряженной струи, движущейся относительно среды.....	117
4. Влияние внешнего поля .....	130
4.1. О капиллярной устойчивости цилиндрической струи диэлектрической жидкости в продольном электростатическом поле .....	130
4.2. Об устойчивости цилиндрической струи, движущейся относительно материальной среды вдоль внешнего электростатического поля.....	141
5. Об устойчивости объемно заряженной струи диэлектрической жидкости, ускоренно движущейся в коллинеарном ее оси электрическом поле .....	155
6. Теоретическое обоснование выделяемых режимов спонтанного распада заряженных струй.....	170
6.1. Дисперсионное уравнение, описывающее осцилляции и устойчивость заряженной капли вязкой жидкости.....	170
6.2. Описание характерных времен.....	180
6.3. Предлагаемая классификация наблюдаемых режимов спонтанного распада струй (электродиспергирования жидкости) .....	186
6.4. Маловязкие жидкости.....	187
6.5. Вязкие жидкости .....	193
Список литературы .....	194
Оглавление.....	203