

03.5

Экспериментальное исследование истечения заряженных струй из капилляра

© А.И. Жакин, П.А. Белов, А.Е. Кузько

Юго-Западный государственный университет, Курск

E-mail: zhakin@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 сентября 2012 г.

Приводятся экспериментальные данные по формам и электрическим характеристикам струй воды, этилового спирта, глицерина и касторового масла в зависимости от прикладываемого внешнего высоковольтного напряжения. Для водных струй построена карта режимов истечения в координатах расход–прикладываемое напряжение. Проанализированы влияние вязкости, поверхностного натяжения и времени релаксации зарядов на закономерности истечения.

В работе анализируются экспериментальные результаты по воздействию электрического поля на тонкие цилиндрические струи, вытекающие вертикально из медного капилляра при плавном изменении напряжения от нуля до момента распада струи на капли. При этом менялись режимы истечения и использовались жидкости с различными физическими характеристиками. Рабочие жидкости выбирались таким образом, чтобы можно было охватить широкий диапазон проводимостей от случая быстрой релаксации зарядов (водопроводная вода, глицерин, этиловый спирт) до медленной релаксации (касторовое масло). Характеристики исследуемых жидкостей (диэлектрической проницаемости ϵ , омической проводимости σ , плотности ρ , коэффициента поверхностного натяжения α , динамической вязкости η и времени релаксации зарядов $\tau_e = \epsilon\epsilon_0/\sigma$) представлены в таблице.

В силу важности предельного случая быстрой релаксации зарядов жидкости выбирались так, чтобы при одинаковой проводимости можно было бы проследить влияние вязкости (например, пара вода и глицерин) или влияние поверхностного натяжения α (при одинаковых проводимостях и вязкости, но различных α , например, пара вода–этиловый спирт). Все эксперименты проводились при отрицательной полярности капилляра.

Физико-химические параметры исследуемых жидкостей

Жидкость	ε	σ , Sm/m	ρ , g/cm ³	α , dyn/cm	η , Pz	τ_e , s
Водопроводная вода	81	10^{-5}	1	72	0.01	$7 \cdot 10^{-5}$
Глицерин	56	10^{-5}	1.26	59.4	14	$5 \cdot 10^{-5}$
Спирт этиловый	28	10^{-6}	0.79	28.5	0.012	$2 \cdot 10^{-4}$
Касторовое масло	2.1	10^{-10}	0.9	36	10	0.19

Следует отметить, что классификация режимов истечения в зависимости от физических характеристик жидкостей, расходов истечения и прикладываемых напряжений делалась различными авторами, например, в ранних работах [1,2], обстоятельном обзоре [3] и исследовании последнего времени [4]. Новизна нашей работы заключается не только в проверке данных [1–4], но и в обнаружении новых режимов, что требует, на наш взгляд, пересмотра сложившихся представлений.

Исследование данных режимов под действием электрического поля производилось на установке вида тонкостенный медный капилляр (катод)–проволочное кольцо. Внутренний диаметр капилляра составлял 1 mm, а диаметр медного кольца, которое было изготовлено из проволоки диаметром 2.3 mm, — 13.5 mm. Расстояние между верхним краем капилляра и кольцом поддерживалось равным 23–30 mm. Истечение струи из капилляра осуществлялось под действием гидростатического давления за счет разности высот колбы-накопителя и кончика капилляра. Электрическое поле между капилляром и кольцом создавалось высоковольтным источником ВС-20, а разрядный ток контролировался цифровым микроамперметром. Для защиты от пробоя использовались ограничительное сопротивление и искровой разрядник. Видеоизображение струй производилось высокоскоростной цифровой камерой (скорость съемки до 1000 кадров в секунду) с использованием осветителя и увеличительной оптической системы. Определение скорости истечения осуществлялось с использованием покадровой развертки. Именно в скоростном режиме 480 fps каждый кадр снимается за $\Delta t = 1/480$ s. Покадровая развертка осуществлялась с помощью программы Media Player Classic, которая устанавливается

программой klmcodec505.exe, имеющей встроенные опции покадрового изображения, захват кадра и таймер. Использование покадровой развертки позволило эффективно контролировать расход истечения, что совпадало с вычислением скорости истечения по формуле Торричелли $V = \sqrt{2gH}$.

Результаты исследования водных струй удобно представить в виде карты режимов истечения, на которой изображены формы и закономерности распада в зависимости от скорости истечения и прикладываемого напряжения (рис. 1). На карте пунктирами и цифрами выделены области следующих режимов истечения.

1. Режим капельного истечения (1–4): 1 — капельное истечение, 2 — переход к волнообразному струйному истечению, 3 — начало дестабилизации, 4 — дестабилизация с укрупнением капель.

2. Переходный режим истечения (5–7): 5 — стабилизация волнового течения, 6 — дестабилизация, 7 — изгибная неустойчивость.

3. Струйное истечение (8–10): 8 — рэлеевская неустойчивость, 9 — стабилизация, 10 — дестабилизация полем.

Сравнивая наши наблюдения с экспериментальными данными [2] и анализом [3], можно отметить следующие отличия. Во-первых, в наших экспериментах в режиме капельного истечения при достаточно больших напряжениях капли всегда укрупняются в направлении падения (см. режим 4 на рис. 2), тогда как в [1,2] этот факт не отмечается. Исследование траекторий движения микрокапель сателлитов показало (см. ниже случай струи касторового масла), что вблизи поверхности струй имеется биполярное распределение зарядов, так что примыкающий к поверхности слой заряжен тем же знаком, что и полярность капилляра, а вдали от этого слоя — противоположным знаком. На наш взгляд, эффект укрупнения капель обусловлен их перезарядкой в облаке положительных зарядов с дальнейшим электростатическим притяжением капель. Второе важное отличие наших данных заключается в том, что из-за существенной нелинейности развития возмущений, которые определяются в основном расходом истечения, формы струй могут быть самыми разнообразными (например, режим 7 на рис. 1). Поэтому искать критерии диспергирования, построенные только на физических константах жидкостей (см. выше таблицу), на наш взгляд, недостаточно.

Влияние поверхностного натяжения изучалось на примере истечения струи этилового спирта. В экспериментах использовался 96%-й раствор медицинского спирта, который, как и водные растворы, относится

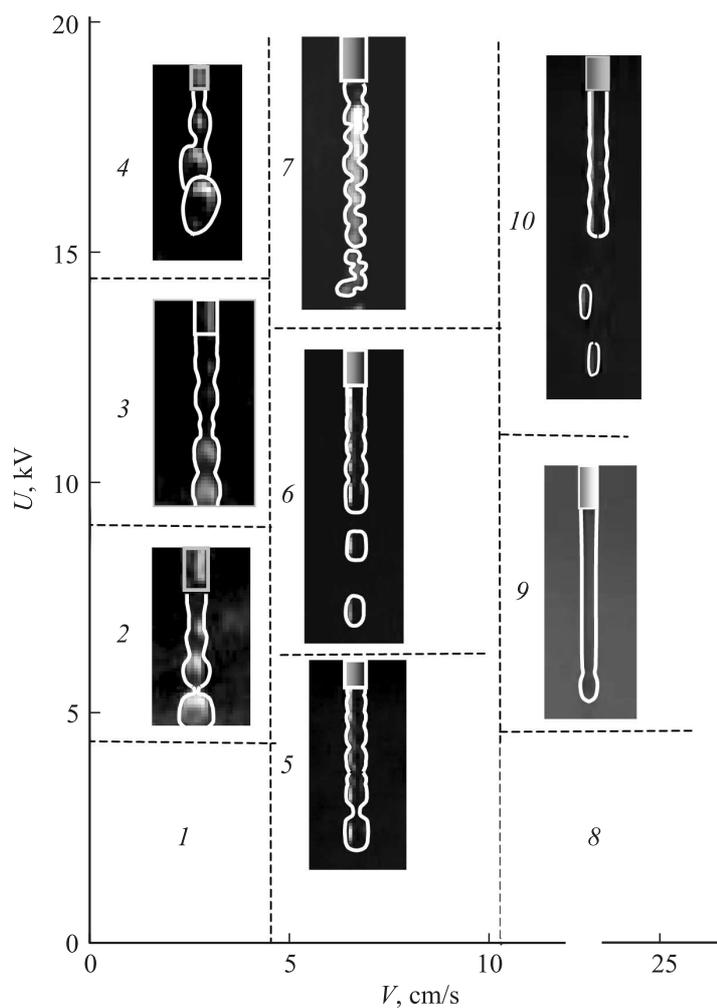


Рис. 1. Карта режимов истечения заряженных водных струй и соответствующие кадры истечений, снятые цифровой камерой.

к жидкостям с быстрой релаксацией зарядов. Отличие заключается в том, что у спирта коэффициент поверхностного натяжения значительно меньше, чем у воды (примерно в 2.5 раза). Поэтому эти эксперименты

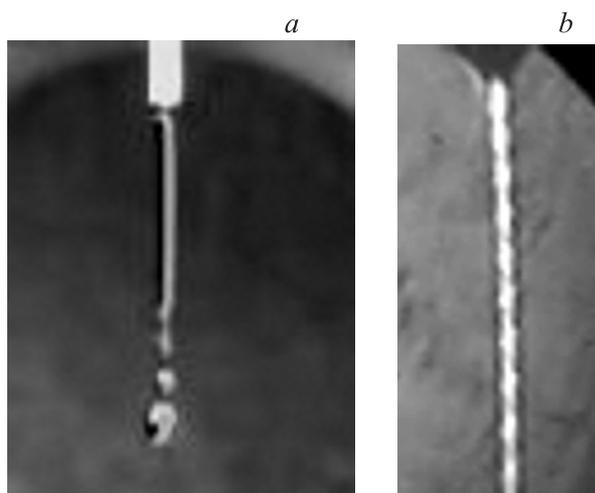


Рис. 2. *a* — истечение заряженных спиртовых струй при $U = 9 \text{ kV}$; *b* — неустойчивое истечение струи глицерина при $U = 12 \text{ kV}$.

позволяют проследить влияние поверхностного натяжения на истечение заряженных струй с быстрой релаксацией зарядов. Отметим новые эффекты, не отмеченные в работах [1–4]. Во-первых, дестабилизация происходит по отношению к коротковолновым возмущениям вблизи конца струи (рис. 2, *a*; сравним: в случае истечения воды дестабилизация происходит по всей длине струи). Второй характерной особенностью является укрупнение капель за счет их слияния (так же как и при водных каплях за счет перезарядки капель). Наконец, на начальном участке истечения поверхностный электрический заряд стабилизирует струю, а вблизи конца — дестабилизирует.

Роль вязкости исследовалась на примере истечения глицерина, который относится к жидкостям с быстрой релаксацией зарядов и большой вязкостью. Исследования показали, что повышение вязкости в докритической области поля может эффективно стабилизировать струю, а в закритической области развивается неустойчивость по отношению к коротковолновым осесимметричным возмущениям, которые на довольно большой длине выстраиваются в последовательность капель одинакового размера (рис. 2, *b*). Эти данные подтверждают наблюде-

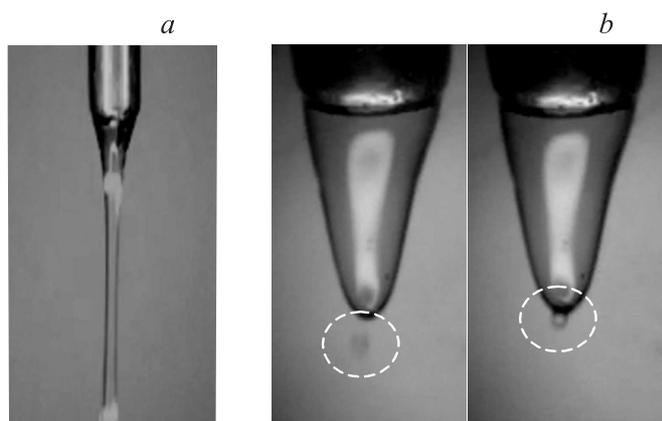


Рис. 3. Влияние поля на различные режимы истечения касторового масла: *a* — стабилизация струи, $U = 6 \text{ kV}$; *b* — последовательные кадры, снятые с интервалом $1/480 \text{ s}$ в режиме капельного истечения, иллюстрирующие возвращение капли сателлита после перезарядки.

ния [4]. Отметим также, что в данном случае перезарядка капля не наблюдается, так как на больших длинах струй биполярная структура распределения зарядов в воздухе исчезает.

Для изучения истечения струи с медленной релаксацией заряда использовалось касторовое масло, обладающее малым временем релаксации заряда (см. таблицу). Эксперименты проводились в режиме струйного и капельного истечения (рис. 3). Так же, как и в случае глицерина, включение поля стабилизирует струю так, что истечение происходит в виде довольно длинной цилиндрической струйки (рис. 3, *a*). Неустойчивость развивается на кончике струи, при этом образуются мелкие капли сателлиты, которые могут перезарядаться двумя способами. В первом происходит однократная перезарядка так, что капля возвращается обратно на заряженную жидкость (рис. 3, *b*). Во втором происходит двукратная перезарядка капли, в результате она вначале приближается к жидкости, а затем начинает двигаться от жидкости. Эти данные подтверждают тот факт, что вблизи кончика струи имеется биполярное распределение заряда. Наконец, в достаточно сильных полях возможно истечение нескольких струй, которое типично

для вязких жидкостей [4]. Отметим, что закономерности поведения струй вязких жидкостей с различными временами релаксации зарядов различны (сравни рис. 2 и 3). Отсюда можно сделать вывод о том, что в случаях медленной релаксации зарядов необходимо использовать более сложные модели расчетов в рамках например, моделей [5,6].

Таким образом показано следующее.

1. В воздушном пространстве вблизи капилляра наблюдается биполярное распределение зарядов, что в значительной степени влияет на режимы истечения жидкостей из капилляров.

2. В силу нелинейного характера развития возмущений формы струй существенно определяются начальными возмущениями, что приводит к непредсказуемым эффектам, например винтовому характеру истечения.

3. В случае медленной релаксации зарядов необходимо учитывать динамику поверхностных зарядов, т.е. использовать модели расчетов с учетом поверхностной проводимости.

Список литературы

- [1] *Верещагин И.П.* и др. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия, 1974. 480 с.
- [2] *Cloupeau M., Prunet-Foch B.* // J. Electrostatics. 1990. N 25. P. 165–184.
- [3] *Ширяева С.О., Григорьев А.И., Святченко А.А.* Классификация режимов работы электрогидродинамических источников жидко-капельных пучков / Научный центр по фундаментальным проблемам вычислительной техники и систем управления. Институт микроэлектроники. Препринт № 25. Ярославль, 1993. 118 с.
- [4] *Шутов А.А.* Формирование и зарядка струй, капель и пленок слабопроводящих жидкостей в электрическом поле: Автореф. дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. М.: ФГУП НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 2003. 47 с.
- [5] *Ширяева С.О.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 3. С. 18–27.
- [6] *Жакин А.И.* // УФН. 2012. Т. 182. № 5. С. 495–520.