

03;12

## Эмиссия струй из капилляра в сильном электрическом поле

© А.А. Шутов

Обнинский государственный технический университет атомной энергетики

E-mail: shutov@iate.obninsk.ru

Поступило в Редакцию 11 сентября 2006 г.

Рассмотрен эффект множественного рождения струй при истечении жидкости из капилляра в сильном электрическом поле. Экспериментально определены условия одновременной эмиссии произвольного количества струй.

PACS: 47.65.-d

1. Классическая рэлеевская схема получения высокодисперсных аэрозольных систем с помощью электростатического поля выглядит следующим образом [1]. Заряженная жидкость подается через капилляр в область поля и вытягивается электрическими силами в тонкую струйку. Далее эта струйка под действием осесимметричных капиллярных возмущений распадается на множество мелких капель.

Существуют и другие механизмы диспергирования жидкости, связанные с доминирующим ростом неосесимметричных возмущений. Например, в работах [2–5] экспериментально и теоретически описан распад струи под действием изгибных возмущений. Продольный распад сильно заряженной струи и условия продольного расщепления струи на две, а также последующий капельный распад исследованы в [6].

Типичным стартовым состоянием процесса эмиссии в отсутствие поля является статический плоский или выпуклый мениск. С ростом межэлектродного напряжения мениск приобретает форму полусфероида. Одновременно возрастает электрическая составляющая в балансе гравитационных, капиллярных и электрических сил. Наибольшие напряжения и зарядовые плотности создаются в вершине полукапли. Нарушение равновесия вследствие доминирования электрических сил приводит к эмиссии жидкости из вершины полукапли.

Вначале эта эмиссия представляет собой поток отдельных капель, однако с повышением напряжения устанавливается режим стационарного истечения тонкой струйки. В более интенсивных полях возможно истечение большего количества струй. В [7] в неоднородном поле типа капилляр–плоскость наблюдалась эмиссия до 8 струй одновременно с поверхности мениска капилляра. Переход от одного стационарного режима истечения к другому происходит под влиянием электрокапиллярной неустойчивости мениска на торцевом срезе капилляра [8].

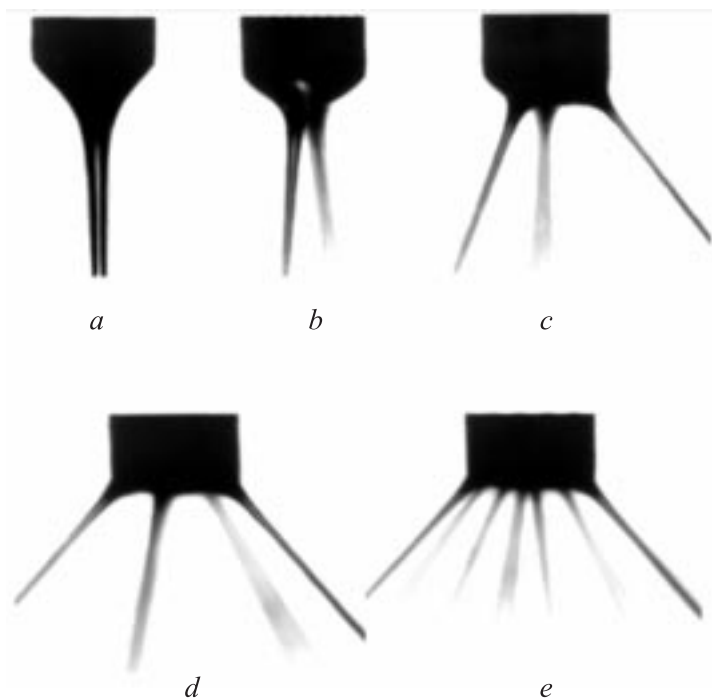
Эффект полиструйного истечения из капилляра необходимо принимать во внимание не только при диспергировании жидкостей, но и в процессе электропрядения — методе получения из полимерных растворов ультратонких, вплоть до нанодиапазона, волокон [9].

2. Жидкость в капилляр подавалась из питательной емкости, в которой создавалось избыточное над атмосферным давление. В отсутствие давления мениск на торцевом срезе капилляра плоский, с повышением давления он приобретает форму полуклапки.

Форму мениска можно также регулировать путем изменения разности потенциалов между капилляром и противоэлектродом. При некотором критическом напряжении с поверхности мениска начинается эмиссия отдельных капель. С увеличением потенциала увеличивается частота эмиссии капель. При дальнейшем увеличении напряжения течение жидкости стабилизируется в виде непрерывной струйки.

Эксперименты проводились в неоднородном поле, которое создавалось в промежутке между двумя горизонтальными металлическими пластинами, расстояние между которыми составляло 7 см. Вертикально ориентированный стальной капилляр диаметром 1 мм располагался в центре верхней пластины. Этот капилляр контактировал с пластиной и мог выдвигаться в область поля. Верхний электрод соединялся с источником высокого напряжения, нижняя пластина заземлялась.

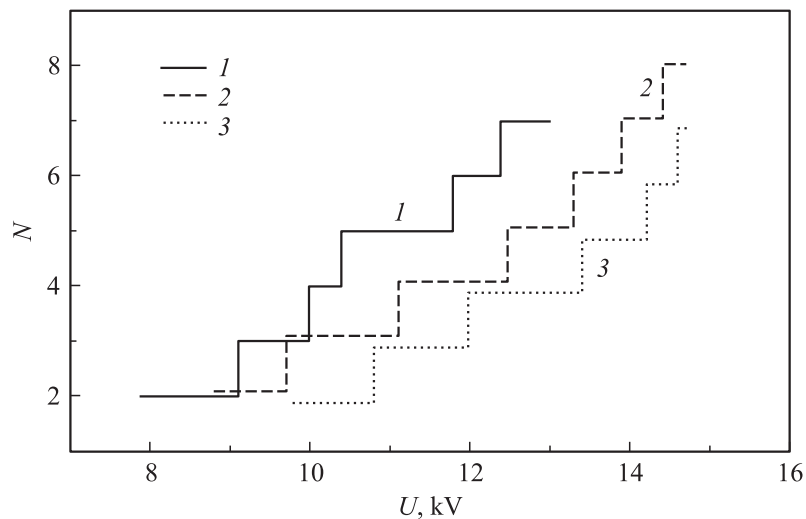
Через капилляр подавалась жидкость с очень малым объемным расходом. Как правило, подача была отрегулирована так, чтобы в отсутствие поля жидкость удерживалась в капилляре силами поверхностного натяжения (нулевой начальный расход). С ростом разности потенциалов начинается истечение жидкости под действием электрических сил, ослабляющих влияние запирающего капиллярного давления. В качестве рабочих жидкостей использовались относительно маловязкие органические жидкости дибутилфталат, этилацетат, дихлорэтан, спирты.



**Рис. 1.** Полиструйное истечение дибутилфталата при различных межэлектродных разностях потенциалов: *a* — 10 kV, *b* — 10.6 kV, *c* — 11 kV, *d* — 12.8 kV, *e* — 14 kV.

На рис. 1 приведены фотографии течения жидкости вблизи капилляра при различных разностях потенциала между капилляром и противоэлектродом. Съемка проводилась в проходящем свете импульсной лампы с длительностью вспышки 0.5 ms. Капилляр был выдвинут из верхней пластины в область поля на 3 см. Эксперименты выполнялись при нулевом начальном расходе.

Вначале струйное течение осесимметрично (рис. 1, *a*). Затем при некотором потенциале симметричность нарушается, и точка истечения смещается от центра к стенке капилляра. При дальнейшем увеличении потенциала наблюдается истечение одновременно двух, трех и более струй (рис. 1, *b–e*). В данном случае неустойчивость мениска



**Рис. 2.** Зависимость количества эмитируемых струй  $N$  из капилляра от межэлектродной разности потенциалов  $U$ : 1 — этилацетат, 2 — пропиловый спирт, 3 — дихлорэтан.

относительно электрокапиллярной неустойчивости приводит к последовательной смене стационарных режимов истечения. В экспериментах наблюдалась эмиссия не менее 14 струй одновременно.

Необходимо отметить, что процесс истечения, изображенный на рис. 1, носит стационарный характер. Отдельные струйки представляют собой непрерывное течение, а не поток отдельных капель. На это указывают четкий профиль сфокусированных объектов и резкие границы светлой полосы на оси струйки.

Переход от одного состояния истечения к другому (рис. 1) характеризуется скачкообразным изменением количества эмитируемых струй. Однако системе требуется некоторое время для установления нового режима истечения при достижении соответствующего порогового напряжения.

Типичные зависимости числа эмитируемых струй  $N$  в зависимости от разности потенциалов  $U$  для этилацетата, пропилового спирта и дихлорэтана приведены на рис. 2. Эти эксперименты также выполнялись при нулевом начальном расходе и выдвинутом на 3 см из пластины

капилляре. Из графиков рис. 2 видно, что эти зависимости представляют собой монотонно возрастающие ступенчатые функции, причем при каждой смене режима эмиссии количество струй меняется на единицу.

Эффект полиструйного истечения впервые наблюдался в работе [7] в сильно неоднородном поле типа игла—плоскость. В отличие от [7], использованная здесь плоскопараллельная система электродов с выдвигаемым капилляром позволяет оценить влияние неоднородности поля на развитие процесса полиструйного истечения. Чем больше расстояние, на которое выдвигается капилляр, тем более стабилен процесс полиструйного истечения. Напротив, уменьшение расстояния подавляет процесс и в однородном поле наблюдается истечение только одной струи. Эти данные указывают на то, что стационарное полиструйное истечение реализуется в полях, напряженность которых превышает пробойную напряженность  $\sim 20 \text{ kV/cm}$  воздушной среды, в неоднородном поле вблизи торцевого среза капилляра — может на порядок превышать эту пробойную напряженность, что создает условия для множественной эмиссии струй. Оценочные значения порога напряженности, соответствующего эмиссии двух струй, составляет  $30\text{--}50 \text{ kV/cm}$ .

При достаточно больших напряжениях начинают сказываться разрядные явления. Процесс вновь дестабилизируется, и с поверхности мениска происходит эмиссия крупных бесформенных фрагментов. Условия истечения в экспериментах подбирались таким образом, чтобы отсутствовали эффекты коронирования, приводящие к нарушению стационарности. В экспериментах с 4-см зазором между капилляром и противозлектродом зарегистрирована одновременная эмиссия наибольшего количества струй: этилацетат — 8, пропиловый спирт и дибутилфталат — 10, дихлорэтан — более 14 струй.

К подавлению процесса полиструйного истечения приводит также увеличение расхода и вязкости жидкости. При расходах свыше  $10^{-2} \text{ cm}^3/\text{s}$  или вязкости жидкости, превышающей  $1P$ , чаще всего наблюдается моноструйное истечение и в редких случаях истечение двух струй одновременно.

**3.** Исследование влияния степени неоднородности поля на развитие процесса полиструйного истечения показало, что в однородном поле возможна эмиссия из капилляра только одной струи. В отсутствие разрядных явлений эмиссия большего количества струй наблюдается в полях, создающих вблизи мениска напряженность, превышающую  $30\text{--}50 \text{ kV/cm}$ .

Найдено, что зависимость количества эмитируемых струй от межэлектродного напряжения является ступенчатой функцией. Переход от одного режима истечения к другому происходит скачкообразно. В результате такого перехода количество эмитируемых струй всегда изменяется не единицу.

Ограничивающим фактором являются разрядные явления, под влиянием которых нарушается стационарность истечения и начинается хаотичная эмиссия крупных бесформенных фрагментов. Увеличение объемного расхода подавляет процесс полиструйного истечения. Препятствует развитию процесса также и увеличение вязкости рабочей жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и администрации Калужской области, проект 04-01-97225.

## Список литературы

- [1] Стрелит Д. (Релей Д.) Теория звука. Т. 2. М.: Гостехиздат, 1955. § 363.
- [2] Huebner A.L. // J. Fluid Mech. 1969. V. 38. N 4. P. 679–688.
- [3] Taylor G.I. // Proc. Roy. Soc. London. 1969. V. A313. P. 453–475.
- [4] Saville D.A. // Phys. Fluids. 1971. V. 14. N 6. P. 1095–1099.
- [5] Mestel A.L. // J. Fluid Mech. 1994. V. 274. P. 93–113.
- [6] Shkadov V.Ya., Shutov A.A. // Fluid Dynamics Research. 2001. V. 28. P. 23–39.
- [7] Zeleny J. // Phys. Rev. 1917. V. 10. N 1. P. 1–6.
- [8] Shkadov V.Ya., Shutov A.A. // Тр. VI Междунар. конф. „Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей“. Санкт-Петербург, 26–30 июня 2000 г. С. 36.
- [9] Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. Волокнистые фильтрующие материалы. М.: Знание, 1968. 77 с.