

УДК 532.694  
DOI: 10.15372/PMTF202315345

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА СПРЕЯ, ПОЛУЧЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ

В. М. Бойко, А. Ю. Нестеров, С. В. Поплавский

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
E-mails: bvm@itam.nsc.ru, al.yur.nesterov@gmail.com, s.poplav@itam.nsc.ru

Проводится исследование зависимости эффективности диспергирования жидкости форсункой от энергии спрея. Выполнен анализ зависимости максимальных значений энергии от расхода жидкости. При расходе жидкости менее 80 г/с получена линейная зависимость, что указывает на высокую эффективность диспергирования. При значениях расхода, превышающих 80 г/с, наблюдается резкое уменьшение энергии капель, что приводит к увеличению размеров капель спрея и свидетельствует об ухудшении качества распыления. Данная закономерность наблюдается во всех рассмотренных режимах.

**Ключевые слова:** пневматические форсунки, газожидкостный поток, аэродинамическое разрушение капель

**Введение.** Пневматические форсунки широко применяются в различных технологических процессах для генерации мелкодисперсных спреев разнообразных жидкостей в широком диапазоне параметров истечения струи. Преимуществами этих устройств по сравнению с распылителями других типов являются относительно слабая зависимость дисперсности спрея от характеристик жидкости и режима истечения струи, простота конструкции, невысокие требования к чистоте используемой жидкости, низкое давление в канале подачи жидкости [1, 2]. Основными параметрами, с использованием которых оценивается эффективность работы пневматических форсунок, являются дисперсность спрея, расходы распыляемой жидкости и газа, в некоторых приложениях важны также геометрические параметры факела распыла [2]. Целесообразно также ввести параметр, с помощью которого можно оценивать общую эффективность работы форсунки и определять режимы, при которых следует ее использовать. Очевидно, что в процессе разрушения струи качество диспергирования жидкости, так же как и геометрия факела, зависит, главным образом, от эффективности передачи энергии газа жидкости. Таким образом, энергия спрея при заданных расходе и скорости газа является определяющим параметром, с помощью которого можно оценить эффективность работы пневматической форсунки. В данной работе предлагается способ определения энергии спрея с использованием экспериментальных данных, а также показана целесообразность применения данного параметра при оценке эффективности диспергирования для выбора оптимального режима работы пневматической форсунки.

Работа выполнена в рамках проекта “Численные и экспериментальные исследования континуальных и разреженных течений применительно к задачам аэродинамики перспективных транспортных систем” (номер госрегистрации АААА-А19-119051590050-2).

**1. Экспериментальное оборудование.** Коаксиальная форсунка внешнего смешения представляет собой воздушное сопло, на срез которого подается жидкость по трубке, расположенной вдоль оси. Для форсунки такой конфигурации получен большой объем данных [3–6], что позволяет оценить степень разрушения струи жидкости и ее зависимость от энергии струи спрея. В данной работе канал подачи газа представляет собой конфузорное сопло, диаметр которого в форкамере равен 19 мм, на срезе — 14 мм; для подачи жидкости использовались трубы двух типов с внутренними диаметрами  $D_1 = 2; 4$  мм.

Исследование форсунок выполнено на установке “Газожидкостный стенд” Института теоретической и прикладной механики СО РАН, детальное описание которой приведено в работах [5, 6]. Установка представляет собой замкнутый контур для подачи жидкости, включающий насос, сопловой узел и приемный резервуар, из которого исследуемая жидкость вновь поступает в контур. Газ подается из ресивера среднего давления через регулирующий клапан; параметры жидкости и газа регистрируются системой датчиков и записываются в электронный протокол эксперимента. В качестве элементов диагностики использованы инструменты теневой визуализации, метод PIV, прототип лазерного допплеровского анемометра с прямым спектральным анализом [7, 8], а также прибор Malvern Spraytec для определения размеров частиц в потоке. В работе [5] показано, что данных, полученных с использованием этого комплекса, достаточно для полного описания процесса истечения газожидкостной струи и состояния спрея на различных расстояниях от среза сопла. Процесс разрушения струи жидкости исследован при значениях расхода жидкости  $Q_l \leq 80$  г/с (диаметр трубы  $D_1 = 2$  мм) и  $Q_l \leq 280$  г/с ( $D_1 = 4$  мм), расход газа варьируется в диапазоне  $Q_g = 30 \div 200$  г/с, что соответствует режимам истечения в диапазоне  $N_{pr} = 1,5 \div 8,0$ .

Уравнение энергии спрея включает две основные составляющие: кинетическую энергию капель и энергию, расходуемую на преодоление сил поверхностного натяжения:

$$E = \sum_n m_l \frac{V_l^2}{2} + \sigma S$$

( $m_l, V_l$  — масса и скорость капли;  $n, S$  — количество капель, прошедших через определенное сечение в единицу времени, и суммарная площадь их поверхности;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения). Масса всех капель в пренебрежении их испарением равна расходу жидкости, а суммарная площадь капель равна

$$S = n\pi d^2 = 6Q/d,$$

где  $d$  — средний диаметр капель. Тогда с учетом определения среднеобъемной концентрации частиц

$$\beta(x) = \frac{4}{\pi} \frac{Q}{D^2(x)V(x)} \quad (1)$$

получаем выражение [5]

$$E(x) = Q \left( \frac{V_l^2}{2} + \frac{6\sigma}{d} \right) = \frac{\pi}{8} \rho_l V_l^3(x) D^2(x) \beta(x) + \frac{3\pi}{2} V_0 \frac{D_0^2}{d(x)} \sigma. \quad (2)$$

Здесь  $V_0, D_0$  — скорость и диаметр струи жидкости на срезе сопла;  $\rho_l$  — плотность жидкости;  $\beta(x)$  — объемная концентрация капель в сечении  $x$ ;  $D(x)$  — диаметр газожидкостного ядра струи в сечении  $x$ . Диаметр ядра струи определяется с использованием данных визуализации как расстояние между двумя точками в определенном сечении струи, в которых капли не затеняют изображение (т. е. ближайшие к границе спрея точки с максимальным показателем освещенности).

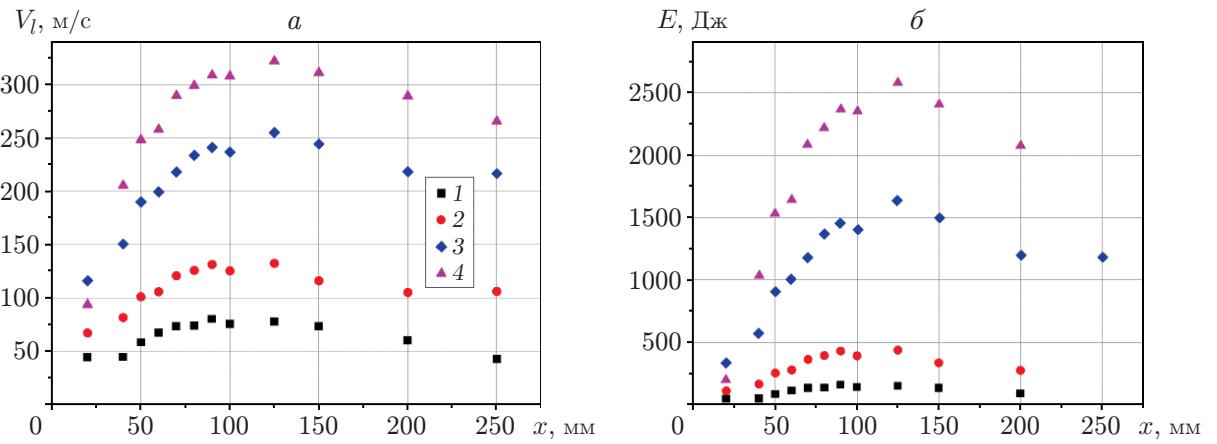


Рис. 1. Профили скорости капли (а) и энергии спрея (б) для форсунки с центральной трубкой диаметром 2 мм при расходе  $Q_l = 50$  г/с:  
 1 —  $N_{pr} = 1,5$ , 2 —  $N_{pr} = 2$ , 3 —  $N_{pr} = 4$ , 4 —  $N_{pr} = 6$

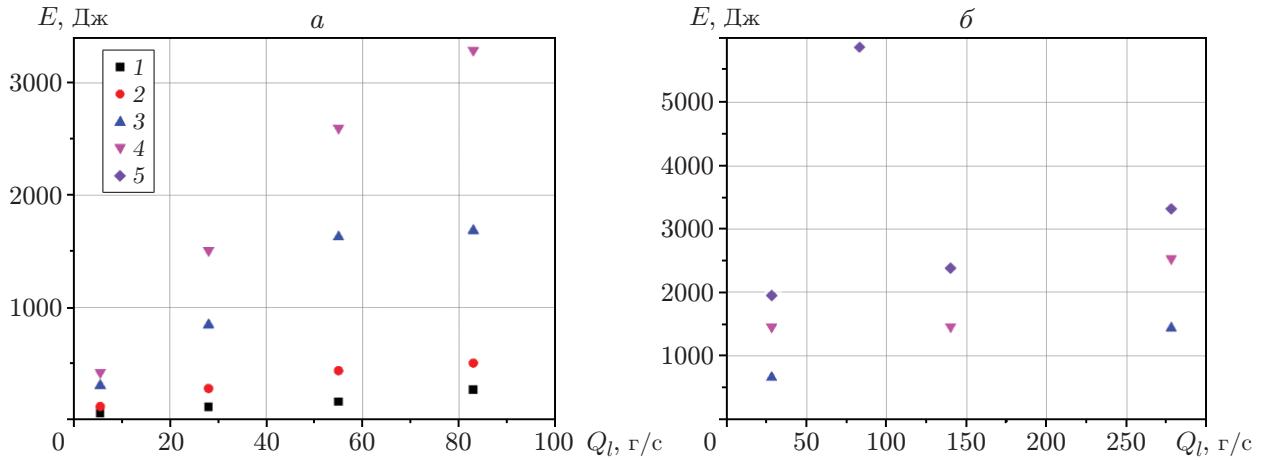


Рис. 2. Зависимость максимальной энергии спрея от расхода жидкости для форсунок с центральными трубками диаметром  $D_1 = 2$  мм (а) и  $D_1 = 4$  мм (б):  
 1 —  $N_{pr} = 1,5$ , 2 —  $N_{pr} = 2$ , 3 —  $N_{pr} = 4$ , 4 —  $N_{pr} = 6$ , 5 —  $N_{pr} = 8$

**2. Результаты исследования.** При анализе эффективности работы форсунки сравнивались профили энергии струи и скорости, а также данные о размерах капель. Профили скорости и энергии струи, полученные для форсунки с трубкой диаметром 2 мм при расходе жидкости  $Q_l = 50$  г/с, представлены на рис. 1. Видно, что зависимости в значительной мере подобны. Это объясняется тем, что кинетическая энергия капель больше энергии поверхностного натяжения. Вблизи сопла все зависимости быстро возрастают, на расстоянии от среза, равном 125 мм, выходят на максимум, после чего медленно убывают. При использовании предлагаемых критериев эффективности оптимальными являются режимы с максимальной энергией потока спрея — показателем наиболее интенсивного межфазного обмена импульсом, т. е. динамики капли и поверхностного взаимодействия капли и газа.

Исследуем динамику максимальной энергии спрея при увеличении расхода жидкости в случаях использования центральных трубок диаметром 2 и 4 мм (рис. 2). На рис. 2,а видно, что малый диаметр центральной трубы наряду с небольшим расходом жидкости приводит к линейному увеличению энергии струи с ростом расхода жидкости как при дозвуковых режимах истечения ( $N_{pr} = 1,5; 2,0$ ), так и при сверхзвуковых ( $N_{pr} = 4, 6$ ).

Отклонение от линейного закона увеличения энергии наблюдается при значении расхода  $Q_l = 80$  г/с, при котором энергия струи меньше прогнозируемой. По-видимому, при этом значении расхода энергия струи газа используется наиболее эффективно; дальнейшее увеличение расхода жидкости приведет к ухудшению качества распыла. Результаты измерений дисперсности капель при сверхзвуковых режимах истечения показывают, что установившийся при  $Q_l \leq 50$  г/с размер капель  $8 \div 12$  мкм в режиме  $N_{pr} = 6$  с ростом расхода до значения  $Q_l = 80$  г/с увеличивается до 20 мкм, что свидетельствует об уменьшении эффективности распыла. Увеличение диаметра центральной трубы до 4 мм приводит к резкому уменьшению эффективности диспергирования. На рис. 2,б видно, что быстрое увеличение энергии при расходе  $Q_l \leq 100$  г/с сменяется резким уменьшением при  $Q_l > 100$  г/с, после чего энергия увеличивается незначительно. Изменение размеров капель свидетельствует об ухудшении качества распыла: увеличение расхода от 30 до 270 г/с приводит к увеличению размеров капель с 10 до 50 мкм в режиме  $N_{pr} = 6$  и с 10 до 30 мкм в режиме  $N_{pr} = 8$ . Таким образом, при значениях расхода  $Q_l > 100$  г/с процесс диспергирования жидкости ухудшается, дальнейший рост расхода приводит к увеличению размера капель в потоке.

**Заключение.** Таким образом, невысокая эффективность распыла жидкости с использованием коаксиальной форсунки внешнего смешения при увеличении расхода жидкости через устройство обусловлена низкой эффективностью смешения фаз в затопленном пространстве. Тем не менее оценка эффективности распыления жидкости в зависимости от энергии струи показывает, что полученные результаты хорошо коррелируют с результатами измерений дисперсности и данными визуализации. Таким образом, энергия струи является показателем эффективности диспергирования жидкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Витман Л. А. Распыливание жидкости форсунками / Л. А. Витман, Б. Д. Кацнельсон, И. И. Палеев. М.; Л.: Энергоиздат, 1962.
2. Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Шалунова А. В. Эффективность различных способов распыления жидкостей // Ультразвуковое распыление жидкостей: Моногр. Бийск: Алт. гос. техн. ун-т, 2010. С. 22–47.
3. Lasheras J. C., Villermaux E., Hopfinger E. J. Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet // J. Fluid Mech. 1998. V. 357. P. 351–379.
4. Urban A., Jozsa V. Investigation of fuel atomization with density functions // Period. Polytech. Mech. Engng. 2018. V. 62, N 1. P. 33–41.
5. Бойко В. М., Нестеров А. Ю., Поплавский С. В. Диспергирование жидкости в высокоскоростных коаксиальных газовых струях // Термодинамика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 3. С. 417–431.
6. Бойко В. М., Лотов В. В., Нестеров А. Ю., Поплавский С. В. Влияние спрея на газодинамическую структуру сверхзвуковой недорасширенной струи // Термодинамика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 3. С. 323–337.
7. Поплавский С. В., Нестеров А. Ю., Бойко В. М. Разработка и применение лазерного допплеровского анемометра с прямым спектральным анализом для исследования высокоскоростных многофазных потоков // Термодинамика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 4. С. 583–591.
8. Boiko V. M., Nesterov A. Yu., Poplavski S. V. Development of LDA method with direct spectral analysis based on fizeau interferometer for aerophysical experiments // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2027. 040008.

Поступила в редакцию 31/VII 2023 г.,  
после доработки — 31/VII 2023 г.  
Принята к публикации 1/IX 2023 г.