

А.В. Иванов, Ю.Д. Смирнов, И.Е. Капранов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ РАБОТЕ ФОРСУНОК ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ

A.V. Ivanov, Y.D. Smirnov, I.E. Kapranov

RESEARCH OF PROCESSES OF DISPERSION OF THE LIQUID AT WORK OF ATOMIZERS OF DUST SUPPRESSION

В Национальном минерально-сырьевом университете «Горном» была предложена конструкция пневмогидравлической форсунки для систем пылеподавления. Важным этапом исследования работы распылителя является изучение процессов диспергирования жидкости с целью определения гидравлических параметров конструкции.

Ключевые слова: форсунка, лигаментные структуры, ячеистые структуры, жидкостная пленка, фрагментация

In Mining University there was set construction of pneumohydraulic sprayer for dust suppression systems. Important investigation phase of work of a spray there is studying of fluid dispersion processes for the purpose of hydraulic parameters definition.

Key words: sprayer, ligament structures, tesseral structures, fluid membrane, fragmentation

В Национальном минерально-сырьевом университете «Горном» был предложен способ круглогодичного пылеподавления с использованием специальных пневмогидравлических форсунок, работа, которой основана на пневмогидравлическом распылении воды в потоке сжатого воздуха [1,2]. Сжатый воздух проходит через профилированное сопло Лавалья, сжимаясь и разгоняясь до сверхзвуковой скорости, а затем, адиабатически расширяясь и снижая свою температуру, далее смешивается с водой и выходит через выходной диффузор.

Важным этапом исследования работы форсунки является изучение процессов распыления жидкой фазы, характера формирования частиц аэрозоля в потоке воздуха и зависимость этих процессов от тех или иных конструктивных особенностей каналов прохождения жидкости. Такие исследования могут проводиться на натуральных моделях или с помощью вычислительного моделирования.

В данной статье приведен обзор материалов, рассматривающих различные типы распылительных форсунок, служащих для преобразования потока жидкости в совокупность мельчайших капель, диспергированных в воздушной среде.

Рассматриваемый тип форсунок, представленный на рис. 1, представляет собой устройство с соосной подачей газа и жидкости, где газ подается через центральный цилиндрический канал, а жидкость втекает через кольцевую щель, образованную внешней стенкой центрального канала и цилиндрической/конической поверхностью большего диаметра.

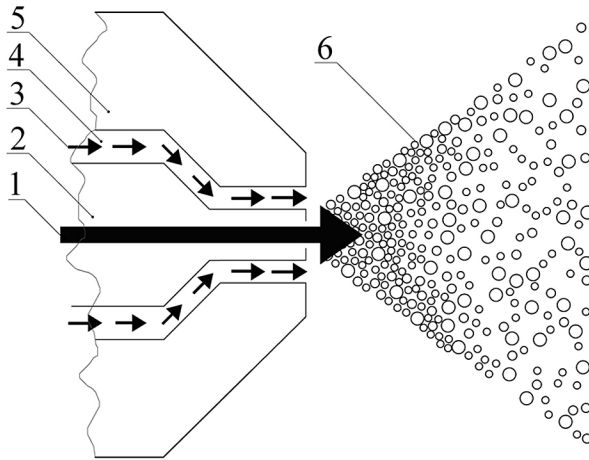


Рис. 1. Схема распылительной форсунки рассматриваемого типа.

1 – направление движения воздуха, 2 – канал для подачи нагнетаемого воздуха, 3 – направление движения жидкости, 4 – канал для подачи жидкости, 5 – корпус распылительной форсунки, 6 – сформированный водный аэрозоль.

Интерес представляют физика процесса фрагментации струи на, так называемые, лигаментные структуры и их дальнейшее дробление на более мелкие жидкостные частицы, современные подходы для моделирования процесса, ключевые физические факторы, определяющие процесс взаимодействия жидкостной пленки и струи газа.

Жидкостная пленка (рис. 2) – тонкая плоская струя жидкости, проистекающая из отверстия кольцеобразного или прямоугольного сечения, величина длины которого более чем на порядок превосходит его ширину.

Лигаментные структуры (рис. 2) – это промежуточная стадия между неустойчивой жидкой пленкой и каплями, обычно бывают в виде круглых протяженных порций жидкости, отделившихся от жидкостной пленки.

Процесс формирования капель определяется характером фрагментации жидкостной пленки, истекающей из кольцевого канала [3]. В устройствах рассматриваемого типа ключевыми физическими факторами, влияющими на параметры распыления жидкости, являются природа взаимодействия потока газа (воздуха) с пленкой жидкости и роль, которую играет струя газа на процесс фрагментации пленки. Подробные экспериментальные исследования [4] позволили выявить влияние параметров потока (скорость жидкой пленки, степень турбулизации обеих фаз в выходных сечениях форсунки и т.п.), а также геометрические параметры каналов подачи компонентов на распад жидкой пленки.

Силы аэродинамического трения, возникающие на границе раздела фаз жидкость-газ приводят к возникновению волн на поверхности жидкостной пленки, которые, нарастая, «срывают» порции жидкости в виде лигаментных структур (рис. 2).

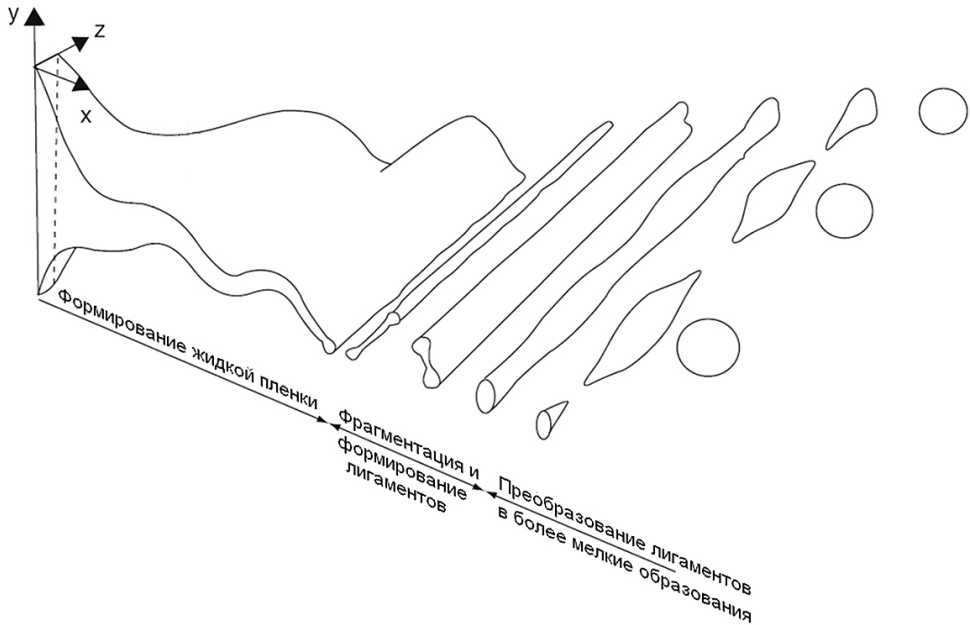


Рис. 2. Формирование лигаментных структур и более мелких образований.

Эти образования в свою очередь продолжают дробиться на более мелкие образования. Выделяют два типа волн на поверхности жидкостной пленки, которые способствуют ее фрагментации. Первый тип – синусные волны, формируются, когда обе поверхности жидкостной пленки совершают колебательные перемещения синфазно, (рис. 3а). Другой тип волн – продольные, возникают при колебаниях поверхностей жидкой пленки в противофазе, (рис. 3б). Многими исследователями, в частности [6], было показано, что при невысоких скоростях течения потоков жидкости и газа, а также при небольших отношениях плотностей газа и жидкости синусные волны оказывают влияние на рост продольных волн. Также было выявлено, что с ростом скорости обеих сред становится все сложнее различить тот или иной тип волн, возмущающих жидкостную пленку. В работе [5] представлены результаты обобщения выполненных ранее теоретических исследований, связанных с распространением этих волн в жидких пленках и их влиянии на устойчивость пленочной структуры.



Рис. 3. Типы волн, возмущающие жидкую пленку.

При работе форсунки рассматриваемого типа, в определенных условиях, в жидкой пленке формируются характерные ячеистые образования, которые представляют собой тонкие жидкие мембраны, окруженные лигаментными структурами значительно большей толщины (рис. 4.). В работе [7] сделано предположение, что такой режим фрагментации потока жидкости реализуется при высоких относительных скоростях жидкой пленки и струи газа.

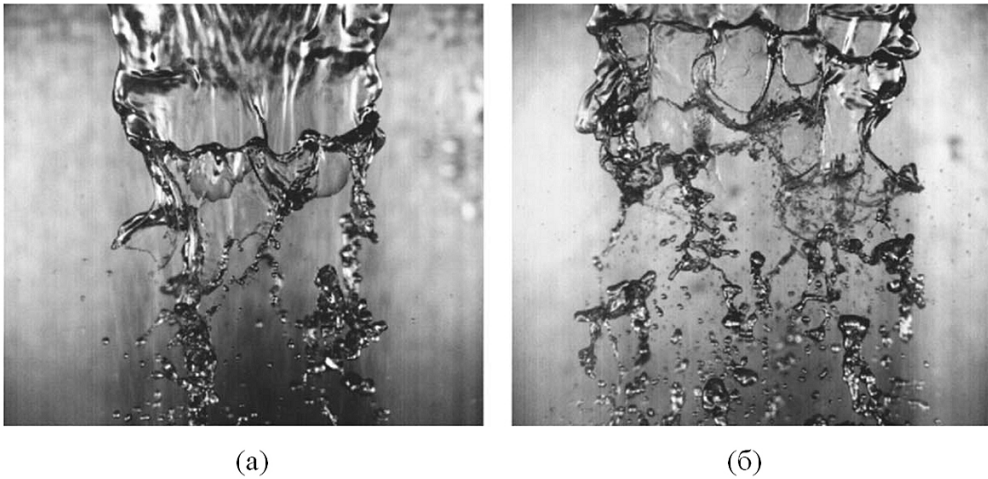


Рис. 4. Режим фрагментации жидкой пленки с образованием ячеистых структур. Скорость жидкости $V_l = 2.9$ м/с (для а и б), скорость воздуха: а) $V_g = 23.7$ м/с; б) $V_g = 37.0$ м/с. [7].

Более качественные экспериментальные исследования, описанные в [8] позволили сделать вывод о том, что режим распада жидкостной пленки с ячеистыми структурами реализуется при наличии неустойчивых синусных волн, распространяющихся по жидкостной пленке. Данный режим приводит к широкому разбросу по размерам капель, поскольку тонкие жидкие мембраны, входящие в состав ячеистых структур распадаются на капли существенно меньшего диаметра, чем капли образованные при дроблении лигаментных колец. Классификация режимов распада жидкой пленки при работе форсунок рассматриваемого типа для невысоких скоростей воздушного потока выполнена в работе [9]. Авторы этого исследования выявили три основных режима: режим Кельвина-Гельмгольца, режим ячеистых структур и режим диспергирования.

В работе [9] представлены, также, результаты экспериментов по определению режимов фрагментации жидкой струи. Эксперименты проводились на форсунке (рис. 5), особенностью являлось наличие, помимо центральной струи воздуха, дополнительной кольцевой струи воздуха движущейся вокруг кольцевой струи жидкости т.е. вода текла и распадалась между двумя потоками воздуха. Но определяющий вклад в процесс распыления вносит все же центральная струя воздуха, описание работы форсунки при различных скоростных режимах приводится в табл. 1.

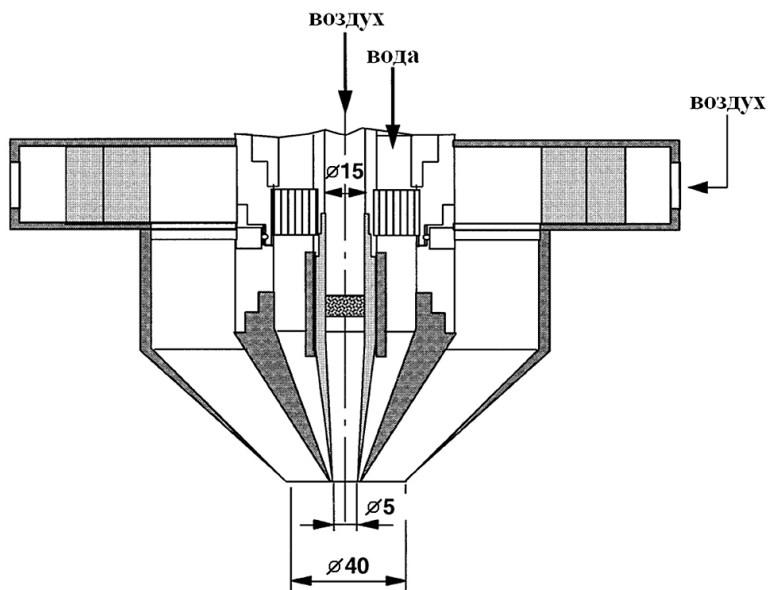


Рис. 5. Схема форсунки для определения режимов фрагментации жидкой струи со смесительной камерой с 12 тангенциальными отверстиями

Таблица 1

Режимы фрагментации жидкой струи

Режим	Условия	Описание
1	$U_{\text{воздуха}} = 0 \text{ м/с}$	Истечение жидкости происходит без соосно подаваемого воздуха, распад потока жидкости соответствует модели процесса, описанного Рэлеем: жидкая пленка фрагментируется на лигаменты (в данном случае тонкие кольца или фрагменты колец) которым сопутствуют капли – сателлиты (спутники)
2	$0 < U_{\text{воздуха}} < 5 \text{ м/с}$	Происходит формирование воздушного пузыря, окружающего жидкую пленку, смыкаемую вниз по потоку, поскольку скорость воздуха слишком мала, чтобы предотвратить смыкание. Смыкание вызвано действием сил поверхностного натяжения в жидкой пленке
3	$5 < U_{\text{воздуха}} < 40 \text{ м/с}$	Наблюдается значительное сокращение длины распада, при увеличении скорости воздуха в этом диапазоне. Появление ячеистых структур
4	$40 < U_{\text{воздуха}} < 120 \text{ м/с}$	Длина распада уменьшается менее выражено
5	$U_{\text{воздуха}} > 120 \text{ м/с}$	Наблюдается режим скоротечного диспергирования. Длина распада уменьшается слабо и теоретически может достигнуть нуля при определенном значении $U_{\text{воздуха}}$, то есть струя будет распадаться сразу же за выходным сечением форсунки

В другом систематическом исследовании влияния соосно подаваемого газа на фрагментацию жидкой пленки [10] авторы включили в рассмотрение факторы присутствия воздушного пограничного слоя и наличия вязкости у воздуха. В этой работе было сделано заключение об определяющей роли скорости потока газа на колебательные явления в пленке жидкости, а также заключение о необходимости учета вязкости газа для повышения точности определения колебательных характеристик пленки.

Параметры течения жидкой пленки истекающей из кольцевого отверстия могут быть охарактеризованы через безразмерный критерий – число Вебера We_l [11]. В рассматриваемом случае число Вебера будет иметь вид:

$$We_l = \frac{\rho_l U_l^2 t_f}{\sigma}, \quad (1)$$

где ρ_l – плотность жидкости (для воды – 998 кг/м³); σ – коэффициент поверхностного натяжения (0,0728 Н/м – для воды при нормальных условиях); U_l – осевая скорость жидкой пленки в выходном сечении кольцевого канала; t_f – толщина жидкостной пленки.

Значение t_f можно вычислить с использованием аналитической зависимости:

$$t_f = 3,66 \left(\frac{D_0 m_l \mu_l}{\rho_l (\Delta P)_l} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где D_0 – больший диаметр кольцевого отверстия; m_l – массовый расход жидкости; $(\Delta P)_l$ – перепад давления в выходном сечении; μ_l – динамическая вязкость жидкости ($1,003 \times 10^{-3}$ кг/(м·с)).

Осевая скорость в выходном сечении может быть определена из закона сохранения массы:

$$U_l = \frac{m_l}{\rho_l \pi t_f (D_0 - t_f)}, \quad (3)$$

Для характеристики параметров потока газа используется число Рейнольдса Re_g , выражение для которого имеет вид:

$$Re_g = \frac{\rho_g U_g D_i}{\mu_g}, \quad (4)$$

где ρ_g – плотность воздуха (1,2 кг/м³); U_g – осевая компонента скорости потока газа в выходном сечении; μ_g – динамическая вязкость воздуха ($1,81 \times 10^{-5}$ кг/(м·с)).

Значение скорости газа U_g , истекающего из круглого отверстия:

$$U_g = \frac{4m_g}{\rho_g \pi D_i^2}, \quad (5)$$

где m_g – массовый расход газа.

Охарактеризовать структуру и параметры распадающейся жидкой пленки возможно с помощью ряда величин (рис. 6).



Рис. 6. Параметры, характеризующие распадающуюся жидкую пленку [10].

Угол θ представляет собой угол между касательной к наружной поверхности жидкой пленки у выходного сечения и осью выпускного канала. Параметр $SW(z)$ характеризует удвоенное радиальное расстояние между осью течения и жидкой пленкой в зависимости от осевой координаты z . Значение L_b определяет осевое расстояние от выходного сечения устройства до границы начала фрагментации жидкой пленки.

Связь между параметрами конуса распыла будет зависеть от геометрических особенностей конкретной форсунки, а также режимов истечения воды и воздуха, то есть чисел Рейнольдса и Вебера.

Представленные в работе [11] результаты экспериментальных исследований демонстрируют влияние чисел We_l и Re_g на картину распада жидкой пленки истекающей соосно с потоком воздуха. На рис. 7 приведены фотоснимки, выполненные авторами этой работы, которые проводили исследование с использованием форсунки рассматриваемого типа.

На снимках можно наблюдать, как с ростом числа Re_g , при неизменном We_l , неустойчивость жидкой пленки при удалении от выходного сечения развивается быстрее. При этом длина участка L_b , после которого происходит фрагментация потока жидкости, сокращается. Рост числа Re_g может быть обусловлен увеличением плотности газа, большей скоростью газа, увеличением диаметра выходного отверстия, а также снижением вязкости газовой среды. С другой стороны повышение We_l при неизменном Re_g увеличивает протяженность L_b . Увеличение числа We_l в первую очередь связано с повышением скорости жидкости, так как скорость входит в данный критерий в квадрате. Повышение числа Вебера также связано с увеличением плотности жидкости, толщины жидкой пленки t_f и уменьшением коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

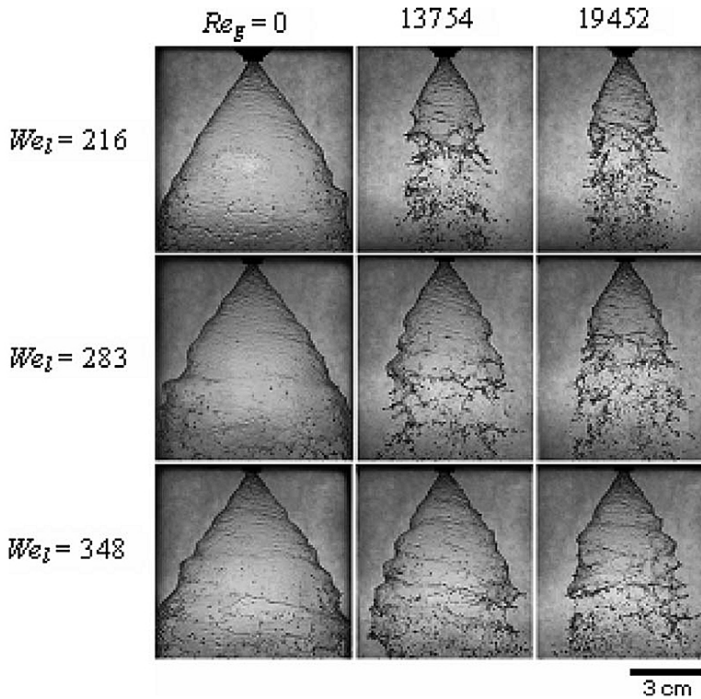


Рис. 7. Фото изображения [11] распыляемой жидкостной пленки для различных режимов истечения воды и воздуха.

В ходе анализа литературных источников, также, было установлено, что для дозвукового разгона, как правило, используется сужающийся канал, в некоторых случаях канал специальным образом профилируется для получения равномерного профиля скорости в поперечном сечении на выходе, а для ускорения газовой фазы до сверхзвуковой скорости и выше, что является необходимым условием снегообразования на выходе, единственным вариантом профилированного отверстия является сопло Лаваля.

Научно-исследовательская работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, Правительства г. Санкт-Петербурга, Центра коллективного пользования ЦКП Национального минерально-сырьевого университета «Горного» и американского фонда гражданских некоммерческих исследований CRDF.

Литература

1. Патент № 2446021 РФ. Форсунка для пылеподавления / М.А. Пашкевич и др. 2012. Бюл. № 9.
2. Смирнов Ю.Д. Разработка инновационного пылеподавляющего устройства для условий северных регионов / Ю.Д. Смирнов, С.В. Ковшов, А.В. Иванов // Записки горного института – СПб.: Горный университет, т. 195, 2012, с. 133-137.

3. *Lefebvre A.H.*, 1989, *Atomization and Sprays*, Hemisphere, New York.
4. *Dombrowski N. and Fraser R.P.*, 1954, "A Photographic Investigation Into the Disintegration of Liquid Sheets," *Philos. Trans. R. Soc. London*, 247, pp. 101–130.
5. *Lin S. P.*, 2003, *Breakup of Liquid Sheets and Jets*, Cambridge University Press, London.
6. *Senecal P.K., D.P. Schmidt, I. Nouar, C.J. Rutland, R.D. Reitz and M.L. Corradini* (1999). Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization. *Int. J. Multiphase Flow* 25, pp. 1073-1097.
7. *Stapper B.E., Sowa W.A. and Samuelsen G.S.*, 1992, "An Experimental Study of the Effects of Liquid Properties on the Breakup of a Two-Dimensional Liquid Sheet," *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 114, pp. 39–45.
8. *Park J., Huh K.Y., Li X. and Renksizbulut M.*, 2004, "Experimental Investigations on Cellular Breakup of a Planar Liquid Sheet From an Air-Blast Nozzle," *Phys. Fluids*, 16, pp. 625–632.
9. *Adzic M., Carvalho I.S. and Heitor M.V.*, 2001, "Visualization of the Disintegration of an Annular Liquid Sheet in a Coaxial Air Blast Injector at Low Atomizing Air Velocities," *Optical Diagnostics in Engineering*, 5, pp. 27–38.
10. *Lozano A., Barreras F., Hauke G. and Dopazo C.*, 2001, "Longitudinal Instabilities in an Air-Blasted Liquid Sheet," *J. Fluid Mech.*, 437, pp. 143–173.
11. *V. Kulkarni, D. Sivakumar, C. Oommen and T.J. Tharakan*, 2010, «Liquid Sheet Breakup in Gas-Centered Swirl Coaxial Atomizers», *ASME J. Fluids Eng.*, 132, pp. 62-68.