

УДК 544.7

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСПАДА СТРУИ ГОРЯЧЕГО ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ, ИНИЦИИРОВАННОГО КОНИЧЕСКИМИ ФОРСУНКАМИ

М. Я. Наз, С. А. Сулейман, Б. Эриваджуди, Кузилати Кушаари

Технологический университет PETRONAS, Бандар Сери Искандар, Малайзия
E-mails: yasin603@yahoo.com, shaharin@petronas.com.my,
bambang_ariwahjoedi@petronas.com.my, kuzilati_kushaari@petronas.com.my

Проведены измерения длины распада струи горячей воды и выполнен феноменологический анализ этого процесса при малых давлениях подачи воды в покоящуюся окружающую среду. Осуществлена визуализация распада конической струи горячей воды при низком нагнетающем давлении. Результаты анализа полученных изображений показывают, что параметры на входе в форсунку оказывают существенное влияние на структуру конической струи аэрозоля. Установлено, что нагрев жидкости за счет частичного испарения позволяет воспроизвести характерную структуру диспергируемого аэрозоля. Показано, что с увеличением чисел Рейнольдса и Вебера при малом времени инъекции ширина конической струи аэрозоля и угол ее раствора изменяются незначительно, при этом макроскопическая область распространения аэрозоля увеличивается. Показано, что нагнетающее давление оказывает значительное влияние на коэффициент расхода, средний расход и среднюю скорость течения, в то время как влияние температуры является менее существенным. Анализ мелкомасштабных изображений показал, что вблизи точки кипения воды в аэрозоле формируется вихрь тороидальной формы.

Ключевые слова: гидроаэродинамика, безвоздушные аэрозоли, тепловая энергия, высокоскоростная визуализация.

Введение. Задачи о распаде струи жидкости исследуются начиная с XIX в. Жидкие аэрозоли и системы их распыления имеют различные промышленные приложения. Подробный обзор ранних работ, посвященных исследованию распада струй жидкостей, приведен в [1, 2]. Однако анализ распада струй горячих жидкостей, истекающих из осесимметричных форсунок вихревого типа, по-видимому, не проводился.

Наиболее простым способом распыления жидкости является гравитационный сифон. Этот способ разработан в начале XX в. и применялся в мебельной и автомобильной промышленности. В настоящее время чаще используются системы обработки поверхностей аэрозодем. Несмотря на то что традиционные воздушные аэрозоли имеют ряд преимуществ по сравнению с гидравлическими и безвоздушными аэрозолями, эти системы характеризуются низкой эффективностью переноса капель жидкости и большими потерями. Кроме того, при распылении аэрозольных сред с помощью воздушных систем распыления расходуется большое количество сжатого воздуха и происходит загрязнение окружающей среды [2]. Поэтому в 60-х гг. XX в. был разработан способ распыления жидкостей в виде гидравлических или безвоздушных аэрозолей. Экологичный и не требующий больших

Работа выполнена частично в рамках долгосрочного исследовательского гранта Министерства высшего образования Малайзии (№ 15-8200-137-4-3).

© Наз М. Я., Сулейман С. А., Эриваджуди Б., Кузилати Кушаари, 2015

затрат способ распыления в виде безвоздушных аэрозолей может рассматриваться как альтернатива традиционному способу распыления. В то же время для распыления струи жидкости с помощью сжатого воздуха необходимы очень большие нагнетающие давления, что ограничивает использование этого способа по сравнению с распылением воздушных аэрозолей. Поэтому безвоздушные аэрозоли не применяются при покраске (покрытии) и очистке различных поверхностей. Кроме того, капли безвоздушных аэрозолей, попадая на поверхность, не расплываются. Вследствие высокого нагнетающего давления наконечники распылителя быстро изнашиваются. Наконец, высокоскоростные струи жидкости на выходе из сопла могут представлять опасность [3].

Целью данной работы является разработка способа распыления безвоздушных аэрозолей, не требующего больших нагнетающих давлений. Один из наиболее экономичных и простых способов решения поставленной задачи — нагревание жидкой среды перед распылением. Введение тепловой энергии в систему распыления приводит к частичному испарению жидкости. Когда жидкость попадает в окружающую среду, происходит фазовая инверсия, при этом паровая фаза в сопле повышает скорость распада струи. Кроме того, формируются капли меньшего диаметра, поэтому не требуется добавлять газовую фазу в распыляемую жидкость. Нагревание жидкости позволяет управлять вязкостью, поверхностным натяжением, течением жидкости, скоростью струи, ее длиной и шириной, временем образования аэрозоля и нагнетающим давлением. Данные аэрозоли могут быть использованы в процессе промывки различных поверхностей, в случае когда применение растворителей невозможно [4].

В данной работе приводятся результаты экспериментов, проведенных на спроектированной установке с использованием трех осесимметричных конических форсунок при различных режимах на входе в сопло. Конструкция установки позволяла мгновенно уменьшать вязкость жидкости, поверхностное натяжение и нагнетающее давление.

1. Технические характеристики системы распыления. Схема экспериментальной установки, используемой для генерации струи аэрозоля и ее визуализации, приведена на рис. 1. С помощью импульсной системы управления создавалась коническая аэрозольная струя. С этой целью при высоких температуре и давлении использовались три осесимметричные конические форсунки RELAB с различными диаметрами отверстий D и живых сечений D_* . Характеристики используемых сопел приведены в таблице. Сопла были снабжены специальным X-образным направляющим устройством, установленным на входе в сопло. Это позволяло создать закрутку потока и сформировать аэрозольную струю в виде полного конуса. Рабочим циклом включения и отключения импульса аэрозоля управляла система, состоящая из пневматического соленоидального клапана PROVAL и программируемого цифрового реле времени (SIGMA, PTC-15). Соленоидальный клапан периодически выбрасывал воду под давлением из распылительного сопла, что позволяло избежать перераспыления. Период работы клапана составлял 1 с. Для поддержания высокой температуры внутри расходного бака и подводящей трубки использовались погруженный в жидкость нагреватель и нагревающий кабель, температура воды контролировалась с помощью термостатических регуляторов. Рабочая температура составляла $20 \div 100$ °С, что позволяло уменьшить нагнетающее давление, вязкость и поверхностное натяжение. Чтобы избежать тепловых потерь, нагревающий кабель был изолирован с помощью керамической ленты. Рабочее давление системы составляло $0,5 \cdot 10^5 \div 1,5 \cdot 10^5$ Па. Для поддержания этого давления использовался нагнетающий жидкость насос, способный выдерживать высокую температуру. Чтобы избежать перегрузки и разрушения насоса, была установлена трубка возвратного течения для отведения избыточной жидкости в расходный бак. На выходе из расходного бака была установлена сетка из нержавеющей стали, препятствующая попаданию в жидкость мусора. Давление жидкости контролировалось с помощью

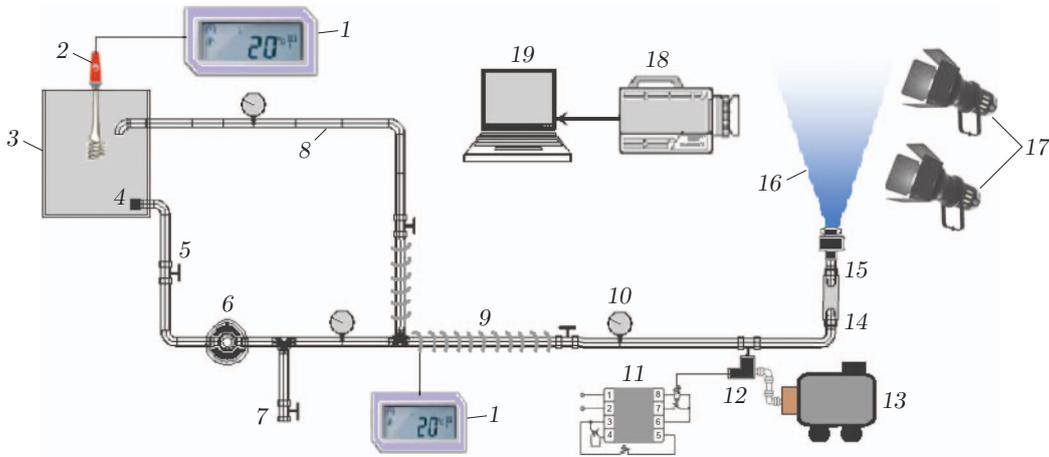


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, оснащенной системой визуализации струи аэрозоля:

1 — термостатический регулятор, 2 — нагреватель, 3 — расходный бак, 4 — сетка из нержавеющей стали, 5 — шаровой клапан, 6 — нагнетающий насос, 7 — сливная труба, 8 — трубка возвратного течения, 9 — нагревающий кабель, 10 — манометр, 11 — цифровое реле, 12 — соленоидальный клапан, 13 — компрессор, 14 — расходомер, 15 — сопло, 16 — струя аэрозоля, 17 — осветительные лампы, 18 — высокоскоростной цифровой фотоаппарат, 19 — компьютер

Технические характеристики конических форсунок

Тип сопла	D , мм	D_* , мм
FC-2	1,19	0,64
FC-3	1,59	1,02
FC-3.5	1,59	1,27

манометров пружинного типа, для смывания оставшегося раствора использовалась сливная труба.

2. Система визуализации струи аэрозоля и измерение ее параметров. Для того чтобы охарактеризовать аэрозоли тестируемой водопроводной воды, путем измерения характеристик течения с использованием неинвазивных способов визуализации изображения определялись параметры струи аэрозоля включая угол раствора конуса аэрозоля, максимальную ширину конуса, коэффициент расхода жидкости через сопло, числа Вебера и Рейнольдса. Для этого изменялись входные параметры: температура, давление, скорость течения жидкости, длительность импульса и динамическая вязкость. Система визуализации, используемая в эксперименте, состояла из высокоскоростного цифрового фотоаппарата Phantomv9.1 и осветительной аппаратуры. Прозрачная аэрозольная камера освещалась со всех сторон девятью лампами, каждая из которых имела мощность 300 Вт, а движение струи аэрозоля визуализировалось с помощью цифрового фотоаппарата. Система фиксировала изображения струи аэрозоля со скоростью 1016 кадр/с и разрешением 1632×1200 пикселей и передавала их в компьютер. Использование камеры с высоким разрешением обеспечивало воспроизведение картины течения в режиме онлайн [5–7].

Для каждого режима течения с помощью метода покадровой обработки изображений определялись параметры струи аэрозоля. Результаты визуализации анализировались с использованием пакета программ MATLAB и другого программного обеспечения. Средняя скорость течения определялась путем деления расхода воды на площадь поперечного сечения отверстия сопла. Коэффициент расхода (отношение массового расхода на срезе сопла

к расходу на срезе идеального сопла) C_D , числа Вебера We и Рейнольдса Re определялись по формулам

$$C_D = \frac{v}{\sqrt{2p/\rho}}, \quad We = \frac{\rho d v^2}{\sigma}, \quad Re = \frac{\rho d v}{\mu},$$

где v — средняя скорость течения на выходе из сопла; p — перепад давления; d — диаметр выходного сечения сопла; ρ — плотность воды; σ — поверхностное натяжение; μ — динамическая вязкость.

3. Результаты исследования и их обсуждение. С использованием неинвазивного метода проведена визуализация течения горячих водных аэрозолей, создаваемых осесимметричными коническими распылителями. Выполнены исследования для трех конических форсунок в диапазонах давлений $P = (0,5 \div 1,5) \cdot 10^5$ Па и температур $T = 20 \div 100$ °С. Наиболее интересные результаты получены при нагнетающем давлении $P = 10^5$ Па и температуре $T = 90$ °С и представлены на рис. 2 (L — длина струи). При меньшем давлении сопло не выходит на расчетный режим работы, при более высоких нагнетающих давлениях в потоке воды возникает неустойчивость вследствие наличия локальных вихрей. Поэтому уравнение для зависящего от плотности массового расхода внутри сопла можно записать в виде [8]

$$\dot{m} = C_D A \sqrt{2\rho(p)},$$

где A — площадь поперечного сечения отверстия. Это уравнение включает площадь живого сечения отверстия сопла, что приводит к большим погрешностям при вычислении массового расхода в области сужения потока. Кроме того, наличие в потоке вязкости вызывает уменьшение массового расхода. Поэтому в формулу введен коэффициент расхода. Зависимость коэффициента расхода от нагнетающего давления и температуры показана на рис. 3, а. Видно, что для всех исследованных сопел с увеличением нагнетающего давления коэффициент расхода уменьшается. С увеличением температуры коэффициент расхода постепенно увеличивается, достигая предельного значения при температуре более 50 °С. Установлено, что наименьший коэффициент расхода имеет сопло FC-3, а наибольший — сопло FC-2.

Обычно частичное парообразование жидкостей в системе достигается путем их нагревания до температуры ниже точки кипения жидкости. Полученная концентрация пара

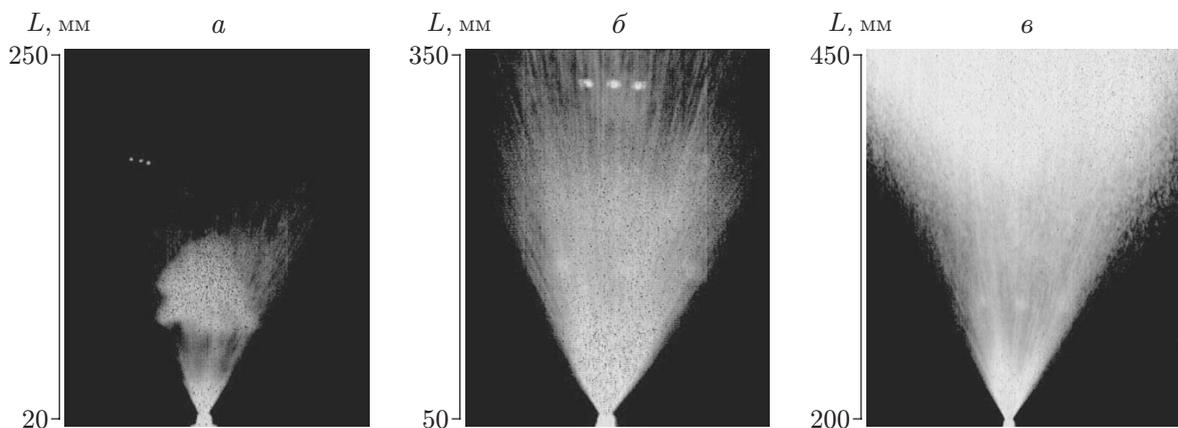


Рис. 2. Результаты визуализации струи аэрозоля при давлении $P = 10^5$ Па и температуре воды $T = 90$ °С в различные моменты времени:
 а — $t = 30$ мс, б — $t = 60$ мс, в — $t = 90$ мс

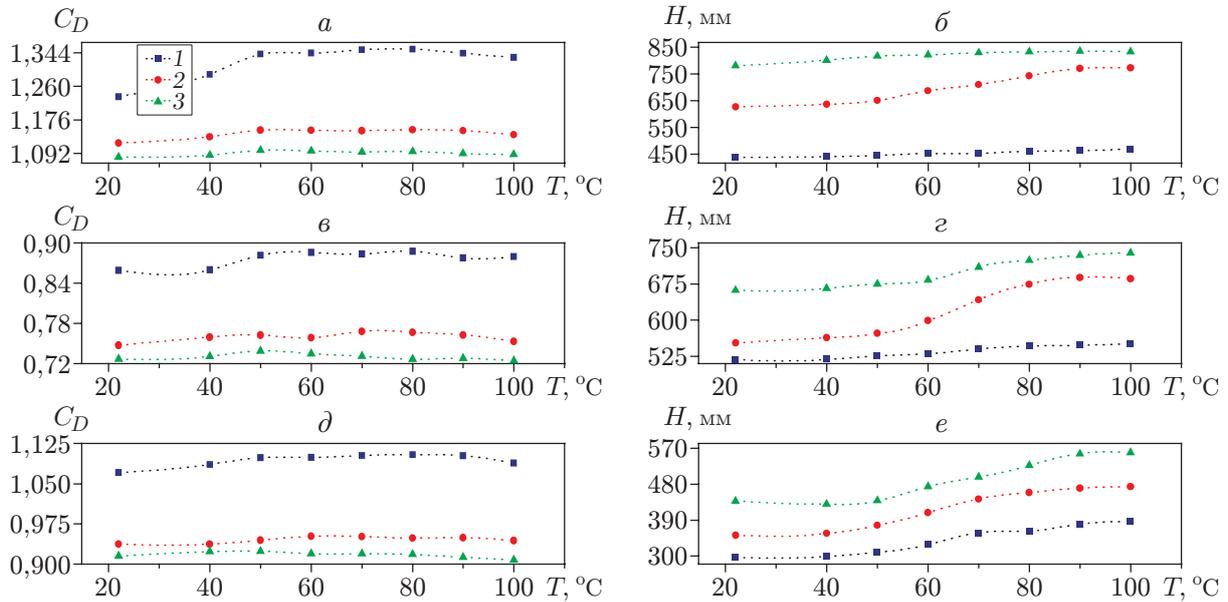


Рис. 3. Зависимости коэффициента расхода C_D (а, в, г) и ширины струи аэрозоля H (б, г, е) от температуры при различных значениях давления: а, б — сопло FC-2, в, г — сопло FC-3, г, е — сопло FC-3.5; 1 — $P = 0,5 \cdot 10^5$ Па, 2 — $P = 10^5$ Па, 3 — $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па

зависит от степени нагрева жидкости, давления и геометрии сопла. В случае если истечение жидкости в окружающую среду сопровождается фазовым превращением, наблюдается процесс распада струи, который поддерживается за счет наличия в сопле паровой фазы [9]. Поэтому в отличие от случая распыления при очень высоком давлении в рассматриваемом случае имеет место однородная структура аэрозоля с монотонно увеличивающейся шириной струи (рис. 3, б). В проведенных экспериментах при увеличении температуры ширина струи увеличивалась наиболее существенно при давлении 10^5 Па, что является преимуществом рассматриваемого способа по сравнению со способом распыления при очень высоких нагнетающих давлениях.

Из рис. 2 следует, что способ распыления с использованием нагрева является эффективным и при умеренных давлениях. Другие режимы течения также могут быть достигнуты путем распыления нагретой жидкости [10]. Течение жидкости внутри подводящей трубки и распылителей может быть описано с использованием безразмерных величин — чисел Вебера и Рейнольдса. На рис. 4 показаны зависимости чисел Вебера и Рейнольдса от температуры. Видно, что с увеличением температуры числа Вебера и Рейнольдса монотонно увеличиваются. Это приводит к более эффективному распылению и увеличению длины струи аэрозоля.

Значения числа Рейнольдса соответствуют трем механизмам распада струи жидкости [4]. При малых числах Рейнольдса образуются крупные капли одинакового размера, что соответствует механизму распада струи Рэлея. При умеренных числах Рейнольдса распад происходит за счет колебаний струи относительно ее оси, до тех пор пока струя не распадется на фрагменты, а затем на капли небольшого размера [11]. Второму режиму соответствует широкий диапазон размеров капель. Наконец, при больших числах Рейнольдса полное распыление струи достигается на малом расстоянии от отверстия. Этому режиму соответствует истечение струи из сопла FC-3.5, для которого числа Рейнольдса были наибольшими среди всех рассмотренных сопел.

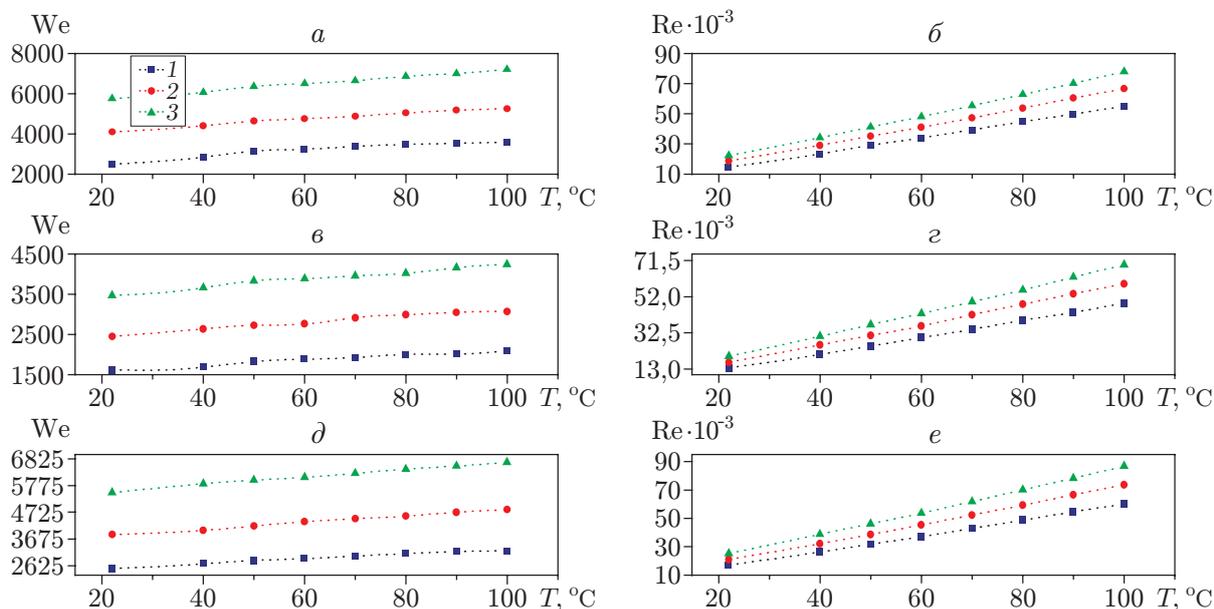


Рис. 4. Зависимости чисел Вебера (*a*, *в*, *д*) и Рейнольдса (*б*, *г*, *е*) от температуры при различных значениях давления:
a, *б* — сопло FC-2, *в*, *г* — сопло FC-3, *д*, *е* — сопло FC-3.5; 1 — $P = 0,5 \cdot 10^5$ Па, 2 — $P = 10^5$ Па, 3 — $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па

Зависимость дальнейшего распыления от относительных скоростей и физических параметров жидкости и конструкции сопла описывается числом Вебера, которое представляет собой отношение сил инерции жидкости к силам ее поверхностного натяжения и оказывает существенное влияние на процесс формирования капли [12]. В данной работе наибольшие значения числа Вебера имели место в сопле FC-3.5, наименьшие — в сопле FC-3.

С использованием среднего значения угла раствора конуса аэрозоля для 15 изображений определена зависимость угла раствора конуса аэрозоля от температуры (рис. 5). При нагнетающем давлении $P = 0,5 \cdot 10^5$ Па угол раствора конуса аэрозоля не изменяется, в то время как при давлениях $P = 10^5$; $1,5 \cdot 10^5$ Па он незначительно увеличивается. Поскольку исследование угла раствора конуса аэрозоля обычно проводится на стадии полного распыления, при уменьшении числа Вебера и постоянном числе Рейнольдса этот угол увеличивается. Это увеличение существенно при больших числах Вебера, в то время как при малых числах Вебера угол раствора не меняется. Таким образом, при больших значениях числа Вебера угол раствора конуса аэрозоля слабо зависит от него [13]. При визуализации струи аэрозоля замечено, что основные потоки капель находятся в пределах конуса с углом раствора $\alpha = 27,3 \div 60,1^\circ$. Если поток капель выходит за пределы конуса с указанными углами раствора, то это означает, что сопло не исправно или повреждено. Поэтому желательно, чтобы визуализация струи аэрозоля и анализ данных были выполнены по крайней мере пять раз. Это позволит гарантировать точность результатов, полученных для угла раствора конуса аэрозоля. В данной работе для различных углов раствора конуса аэрозоля максимальная погрешность составляла 7,3 %.

Определена зависимость положения переднего фронта струи аэрозоля, которое определяется как расстояние от выхода из сопла в определенный момент времени, от температуры, времени и давления. На рис. 6 показано положение переднего фронта струи в зависимости от времени при $T = 22, 90^\circ\text{C}$. Установлено, что с увеличением нагнетаю-

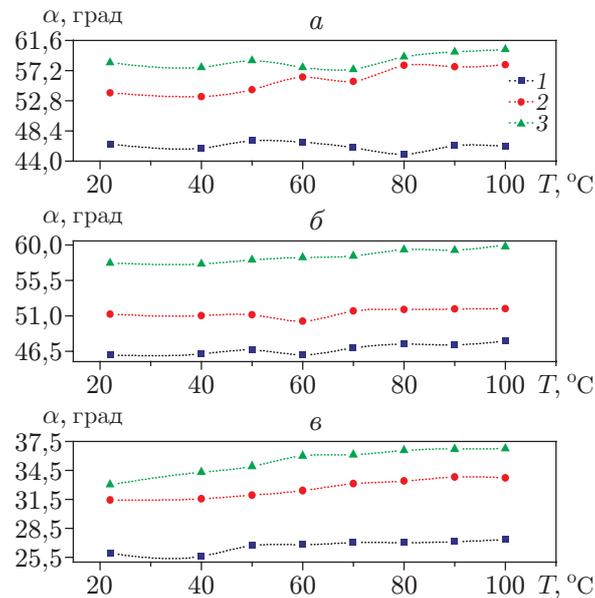


Рис. 5. Зависимость угла раствора конуса аэрозоля α от температуры при различных значениях давления:
 а — сопло FC-2, б — сопло FC-3, в — сопло FC-3.5; 1 — $P = 0,5 \cdot 10^5$ Па, 2 — $P = 10^5$ Па, 3 — $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па

шего давления и времени значение L увеличивается [14]. Из рис. 6 следует, что процесс парообразования оказывает влияние на положение переднего фронта струи аэрозоля [15]. При анализе результатов визуализации струи была также определена скорость струи и отмечено, что с увеличением глубины проникания струи ее скорость уменьшается, а с увеличением температуры и давления увеличивается. Для сопла FC-3.5 получено наибольшее значение L , для сопла FC-2 — наименьшее.

При температуре воды $T = 90$ °C и времени инъекции в диапазоне 45–60 мс отмечено резкое изменение значений L и скорости струи (рис. 7). Эти результаты подтверждают, что в процессе распыления жидкой фазы ниже выхода из сопла формируется облако капель (см. рис. 2, а). Это вихревое облако тороидальной формы расположено на внешней границе конуса аэрозоля и наиболее четко видно в случае использования сопла FC-2. Сформировавшийся вихрь перемещался, искривлялся и растягивался. Вихревая трубка была ограничена поверхностью, подобной тору. Этот вихрь, возникающий на ранней стадии распада струи, быстро расширялся, частично искривлялся и разрушал незамкнутые вихревые линии. В области ядра вихря течение струи становилось вихревым, а угловая скорость в направлении, приблизительно параллельном направлению вихревой нити, была не равна нулю. По-видимому, это происходило вследствие наличия градиентов давления в окружающем воздухе, что вынуждало струйное течение изгибаться вокруг оси [16].

В проведенных экспериментах характерная структура аэрозолей, полученных при давлениях инъекции $P = 10^5; 1,5 \cdot 10^5$ Па, имела три фазы. На ранней стадии инъекции наблюдалась развивающаяся фаза с высокой скоростью струи. Струя была нестационарной, плохо распыленной и состояла из диспергируемых капель. На второй стадии импульс капли аэрозоля уменьшался и в окружающей среде формировались структуры, подобные вихревому облаку. Эти структуры переносились и разрушались, поскольку вблизи оси инжектора струйное течение значительно ослабевало [17]. На заключительной стадии формировалась квазистационарная картина с приблизительно постоянным потоком массы воды.

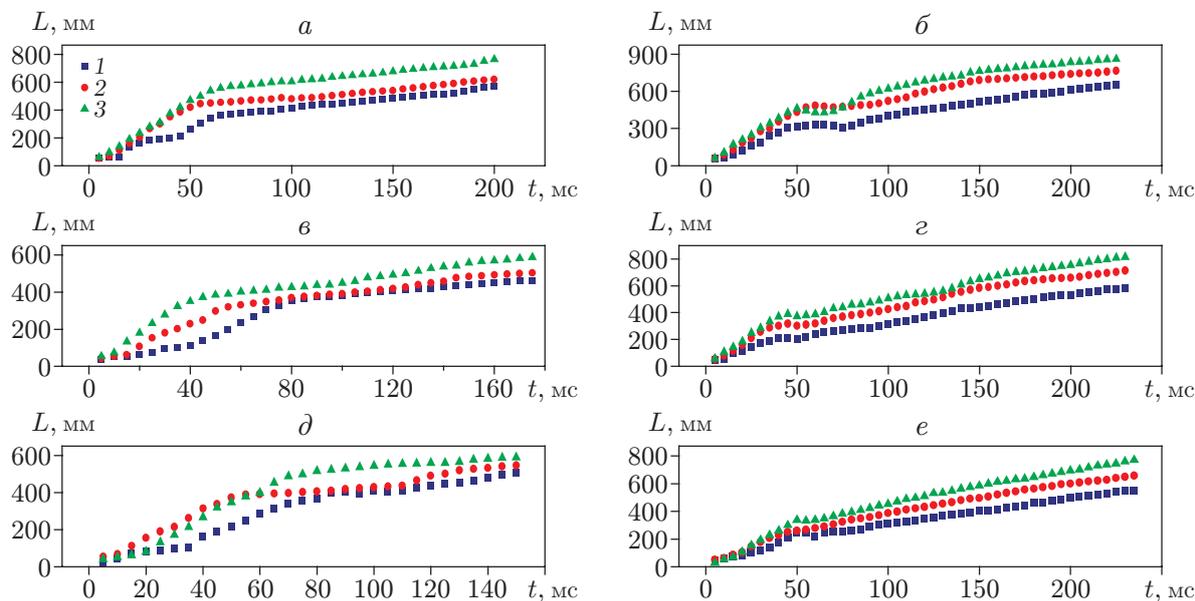


Рис. 6. Зависимость положения переднего фронта струи аэрозоля от времени при $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (*a*, *в*, *д*) и $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (*б*, *г*, *e*) и различных значениях давления: *a*, *б* — сопло FC-3.5, *в*, *г* — сопло FC-3, *д*, *e* — сопло FC-2; 1 — $P = 0,5 \cdot 10^5$ Па, 2 — $P = 10^5$ Па, 3 — $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па

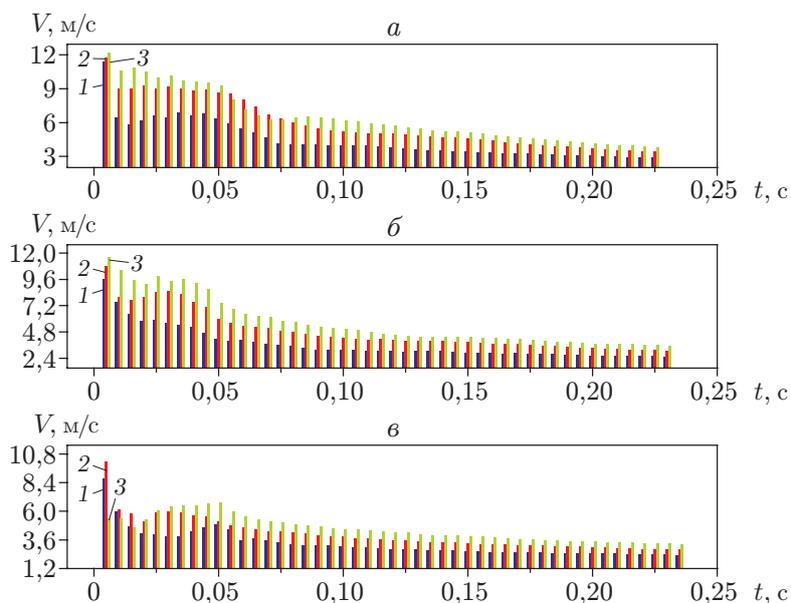


Рис. 7. Зависимость скорости струи аэрозоля от времени при $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различных значениях давления: *a* — сопло FC-3.5, *б* — сопло FC-3, *в* — сопло FC-2; 1 — $P = 0,5 \cdot 10^5$ Па, 2 — $P = 10^5$ Па, 3 — $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па

При этом передний фронт струи аэрозоля перемещался практически по линейному закону. Кроме того, в структуре аэрозоля горячей воды, распыленной при нагнетающем давлении $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па, формировались многоступенчатые вихревые облака. В дальнейшем эти облака преобразовывались в структуры, подобные листу, а затем — в полностью развитые структуры аэрозоля. При нагнетающем давлении $P = 10^5$ Па на ранней стадии инъекции наблюдалось единственное вихревое облако. Через 30 мс после начала инъекции из первого облака появлялось второе облако, которое было четко видно в течение 40 мс. Все возникающие облака полностью разрушались через 100 мс с момента начала инъекции, после чего струя воды превращалась в аэрозоль. Облака, возникающие при нагнетающем давлении $P = 10^5$ Па, существовали в течение более длительного промежутка времени по сравнению с вихревыми облаками, генерируемыми давлением $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па. Основными различиями структур аэрозоля, возникающих при давлениях $P = 10^5$ Па и $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па, являются длительность существования отдельных фаз и последовательность их возникновения [18, 19]. Интерпретация этих фаз аэрозоля — сложная задача, для решения которой необходимо провести дополнительные исследования. Однако для оценки радиуса этих структур и расстояния между ними и осью сопла можно использовать скоростную фотосъемку. Поскольку в данной работе граница вихревых облаков определена неточно, их радиусы не были оценены.

Иногда данные вихри в окружающем воздухе становятся видимыми вследствие наличия струек небольших капель воды, возникающих вследствие конденсации в областях относительно низких температур и давлений, особенно когда распыляемая жидкость нагревается. Установлено, что на ранней стадии вихрь исчезал вскоре после возникновения и распада структуры, начавшей принимать однородную форму (см. рис. 2). Движущиеся вихри переносят некоторый импульс, момент импульса, массу и энергию. В идеальном случае эти величины не должны диссипировать и вихрь должен сохраняться [20]. Однако в действительности наличие у жидкостей динамической вязкости приводит к рассеиванию энергии вихря, в результате чего вихревая линия заканчивается внутри струйного течения, а не на границе струи и поэтому остается гладкой при распаде струи.

4. Выводы. В работе описаны результаты экспериментов по распылению водопроводной воды с образованием конических аэрозольных структур. Проверены три конические форсунки в интервале температур $T = 20 \div 90$ °С при нагнетающем давлении в диапазоне $P = (0,5 \div 1,5) \cdot 10^5$ Па. С помощью скоростного цифрового фотоаппарата проведена визуализация струи аэрозоля. Результаты визуализации подтвердили, что значительный нагрев воды влияет на распад струи и поведение аэрозоля в окружающем воздухе. По-видимому, инъекция тепловой энергии в систему является наиболее важным фактором, который оказывает существенное влияние на числа Вебера и Рейнольдса. Оптимальные значения этих параметров получены при нагнетающем давлении $P = 10^5$ Па и температуре воды $T = 90$ °С. Показано, что числа Вебера и Рейнольдса являются наиболее важными параметрами, определяющими процессы распада струи жидкости и парообразования, поскольку эти числа создают баланс, позволяющий сохранить оптимальные условия распыления. В процессе распыления вблизи точки кипения воды в струе обнаружены вихревые облака тороидальной формы, которые необходимо исследовать дополнительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bogy D. B.** Drop formation in a circular liquid jet // Annu. Rev. Fluid Mech. 1979. V. 11. P. 207–228.
2. **Santangelo P. E.** Characterization of high-pressure water-mist sprays: Experimental analysis of droplet size and dispersion // Exp. Therm. Fluid Sci. 2010. V. 34. P. 1353–1366.

3. **Hede P. D., Bach P., Jensen A. D.** Two-fluid spray atomisation and pneumatic nozzles for fluid bed coating/agglomeration purposes: A review // *Chem. Engng Sci.* 2008. V. 63, N 14. P. 3821–3842.
4. **Park S. H., Kim H. J., Suh H. K., Lee C. S.** Atomization and spray characteristics of bioethanol and bioethanol blended gasoline fuel injected through a direct injection gasoline injector // *Intern. J. Heat Fluid Flow.* 2009. V. 30. P. 1183–1192.
5. **Khusid B. M.** Breakup of a free jet of a viscoelastic liquid // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1982. V. 23, N 1. P. 48–55.
6. **Kiselev S. P., Kiselev V. P., Zaikovskii V. N.** Effect of gas flow swirling on coating deposition by the cold gas-dynamic spray method // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2012. V. 53, N 2. P. 207–217.
7. **Dubrovskii V. V., Podvysotskii A. M., Shraiber A. A.** Experimental investigation of drop fragmentation by aerodynamic forces // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1991. V. 32, N 5. P. 734–740.
8. **Mun R. P., Young B. W., Boger D. V.** Atomization of dilute polymer solutions in agricultural spray nozzles // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1999. V. 83. P. 163–178.
9. **Dumouchel C.** The experimental investigation on primary atomization of liquid streams // *Exp. Fluids.* 2008. V. 45. P. 371–422.
10. **Marmottant P., Villermaux E.** On spray formation // *J. Fluid Mech.* 2004. V. 498. 73111.
11. **Sirignano W. A.** Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999.
12. **Andrade R., Skurtys O., Osorio F.** Experimental study of drop impacts and spreading on epicarps: effect of fluid properties // *J. Food Engng.* 2012. V. 109. P. 430–437.
13. **Jensen K. D.** Flow measurements // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engng.* 2004. V. 26. P. 400–419.
14. **Er D. Z., Liew C. V., Heng P. W.** Layered growth with bottom-spray granulation for spray deposition of drug // *Intern. J. Pharm.* 2009. V. 377. P. 16–24.
15. **Yarin A.** Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2006. V. 38. P. 159–192.
16. **Kermode A. C.** Mechanics of flight. 8th ed. L.: Pitman Publ., 1972.
17. **Zhong Z. W., Han Z. Z.** Turning of glass with abrasive waterjet // *Materials Manufactur. Proc.* 2002. V. 17, N 3. P. 339–349.
18. **Zhong Z. W., Han Z. Z.** Performance comparison of four waterjet nozzles // *Materials Manufactur. Proc.* 2003. V. 18, N 6. P. 219–227.
19. **Reitz R. D.** A photographic study of flash-boiling atomization // *Aerosol Sci. Technol.* 1990. V. 12, N 3. P. 561–569.
20. **Clancy L. J.** Aerodynamics. L.: Pitman Publ., 1975.

Поступила в редакцию 16/V 2013 г.
