

УДК 621.762.2.66.063.7

*В. А. Архипов^{1,2}, С. С. Бондарчук^{2,3}, М. Я. Евсевлев⁴, И. К. Жарова¹, А. С. Жуков⁵,
С. В. Змановский⁴, Е. А. Козлов¹, А. И. Коноваленко¹, В. Ф. Трофимов⁵*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ ЭЖЕКЦИОННЫМИ ФОРСУНКАМИ

Представлены результаты экспериментального исследования дисперсности капель жидкости в факеле распыла эжекционных форсунок. Измерение функции счетного распределения капель по размерам проводилось методом малых углов индикатрисы рассеяния зондирующего лазерного излучения на пневмогидравлическом стенде в условиях холодных продувок. Проведен анализ эффективности предложенных схемных решений форсунок.

Ключевые слова: *распыливание жидкости, эжекционная форсунка, факел распыла, дисперсность капель, пневмогидравлический стенд, метод малых углов индикатрисы рассеяния, функция распределения капель по размерам.*

Введение. Проблема распыливания (или диспергирования) жидкости появилась и изучается до настоящего времени применительно к обеспечению надежного сгорания топливных смесей в двигателях внутреннего сгорания и в камерах сгорания ракетных двигателей. В порошковой металлургии эти вопросы активно изучаются с середины прошлого века, а в настоящее время приобрели особую актуальность в связи с повышением требований к размерам частиц конечного порошкового продукта.

Общие принципы и классические методы распыливания жидкости подробно обсуждены во многих фундаментальных работах, в частности, в монографиях [1–3], а применительно к порошковой металлургии в [4, 5]. Методы распыливания жидкости классифицируются по способам подвода энергии, расходуемой непосредственно на диспергирование: гидравлическое, механическое, пневматическое, акустическое, электростатическое, электрогидравлическое, ультразвуковое, пульсационное распыливание, распыливание с предварительным газонасыщением и комбинированные методы распыливания. Любой из упомянутых способов распыливания может оказаться наиболее экономичным для конкретных условий производства и требований к качеству и дисперсности целевого продукта.

Из всего многообразия способов распыливания жидкостей [1–5] в металлургии для производства высокодисперсных порошков из расплава алюминия наибольшее распространение получили технологии с использованием эжекционных форсунок. В эжекционных форсунках, относящихся к пневматическому типу распыливающих устройств, подача и диспергирование жидкости осуществляется за счет создаваемого перепада давлений на срезе сопла форсунки между распыливаемой жидкостью и вдуваемым газом [4]. Одним из преимуществ практического использования эжекционных форсунок является возможность совершенствования существующей технологии за счет модификации элементов распыливающего узла форсуночного блока.

В настоящей работе представлены результаты отработки ряда технических решений для форсуночного узла в условиях холодных продувок. При экспериментальных исследованиях ставилась задача по выявлению закономерности влияния различных факторов (форма сопла для подачи газа, наличие расщепителя, способы подвода газа) на дисперсность капель факела распыла. Принципиальная возможность применения закономерностей диспергирования модельных жидкостей, установленных в условиях холодных продувок, к распыливанию металлических расплавов является основанием для проведения экспериментальных исследований на модельном пневмогидравлическом стенде с последующим переносом результатов на реальный процесс.

Методика экспериментального исследования. Испытания образцов модифицированных вариантов форсунок проводились на модельном пневмогидравлическом стенде с системой оптической диагностики. Блок-схема измерительного стенда приведена на рис. 1. Стенд включает исследуемую форсунку 1 и системы подачи, измерения и регулирования расходов жидкости и газа. Система подачи жидкости включает резервуар 2 с рабочей

¹НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36; ²Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН. 659332, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1; ³Томский государственный педагогический университет. Россия, 634041, г. Томск, ул. Киевская, 60; ⁴Филиал "Центра инновации" ООО "СУАЛ-ПМ". Россия, 666034, Иркутская обл., г. Шелехов, ул. Южная, 3; ⁵Томский государственный университет. Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36; э-почта: zharova@niipmm.tsu.ru. Поступила 20.05.2013.

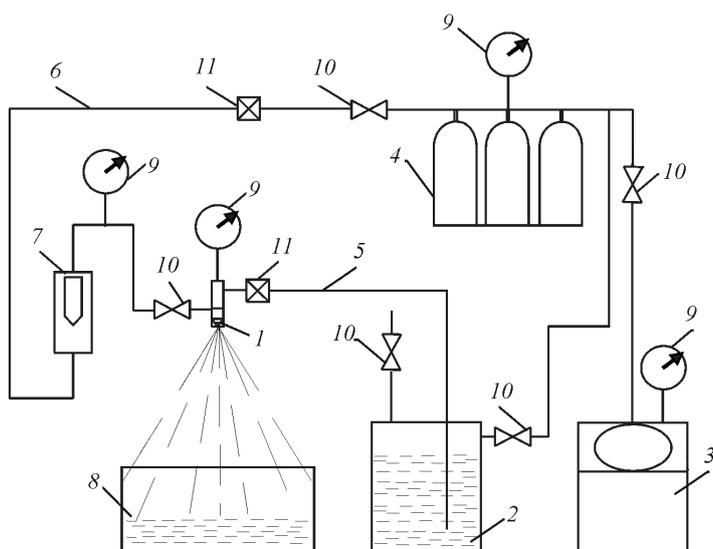


Рис. 1. Блок-схема пневмогидравлического стенда: 1 — исследуемая форсунка; 2 — резервуар для рабочей жидкости; 3 — компрессор; 4 — батарея баллонов; 5 — трубопровод для подачи рабочей жидкости; 6 — трубопровод для подачи сжатого газа; 7 — ротаметр; 8 — мерная емкость; 9 — манометры; 10 — запорные вентили; 11 — редукторы

жидкостью, компрессор 3 и батарею баллонов 4. Жидкость подается на форсунку по трубопроводу 5. Газ подается на форсунку из батареи баллонов 4 по трубопроводу 6. Измерение расхода газа осуществляется ротаметром 7, расхода жидкости — мерной емкостью 8. Для контроля давления используются манометры 9. Для регулирования подачи жидкости и газа в схему стенда включены запорные вентили 10 и редукторы 11.

Подаваемая через форсунку жидкость при взаимодействии с потоком газа образует факел распыла, который зондируется лазерным излучением. Пневмогидравлический стенд обеспечивает проведение испытаний модельных образцов форсунок в диапазоне рабочих давлений 0.1–1.0 МПа при изменении расхода жидкости до 10.8 кг/час и воздуха до 6.3 м³/час.

Для определения дисперсного состава капель в факеле распыла форсунки применен метод измерения угловой индикатрисы рассеяния лазерного излучения. Теоретической основой метода является использование аналитического

описания рассеяния света на частицах, более крупных по сравнению с длиной волны излучения. Рассеяние происходило под малыми углами к направлению падающего излучения. При выполнении условий рассеяния света независимыми частицами и его однократности интенсивность рассеянного полидисперсными частицами излучения может быть определена из уравнения теории дифракции [6, 7]:

$$I(\theta) = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^3 \frac{I_0}{\theta^2} \int_0^\infty \beta^2 f(\beta) J_1^2(\beta\theta) d\beta . \tag{1}$$

В [6] показано, что решение интегрального уравнения (1) для функции $f(\beta)$ имеет вид:

$$f(\beta) = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^3 \frac{1}{\beta^2} \int_0^\infty D(\theta) H(\beta\theta) d\beta . \tag{2}$$

Ядро обращенного интегрального уравнения (2), зависящего от произведения $(\beta\theta)$, равно

$$H(\beta\theta) = -2\pi\beta\theta J_1(\beta\theta) Y(\beta\theta) ,$$

где $Y(\beta\theta)$ — функция Неймана.

Измерительная информация об индикатрисе рассеяния содержится в функции $D(\theta)$:

$$D(\theta) = \frac{d}{d\theta} \left[\frac{I(\theta)}{I_0} \theta^3 \right] = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^3 \int_0^\infty \beta^2 f(\beta) K(\beta\theta) d\beta ,$$

где ядро $K(\beta\theta)$ имеет вид:

$$K(\beta\theta) = \frac{d}{d(\beta\theta)} \left[\beta\theta J_1^2(\beta\theta) - \frac{1}{\pi} \right] .$$

Функцию распределения частиц по размерам по экспериментально измеренной индикатрисе рассеянного излучения определяют из решения обратной задачи оптики аэрозолей с использованием приведенных зависимостей. Восстановление функции распределения $f(\beta)$ по измеренной индикатрисе рассеяния $I(\theta)$ проводилось численно с помощью метода и алгоритма расчета, основанных на концепции подбора при решении серии прямых задач (метод прямого поиска) [8].

Для определения дисперсности капель в факеле распыла исследуемых форсунок разработана лазерная установка, основанная на измерении интенсивности излучения, рассеянного на аэрозольных частицах в области малых углов. Система оптической диагностики включает блок лазерного излучателя и блок измерения параметров лазерного излучения (рис. 2). В качестве источника зондирующего излучения использовался лазерный модуль KLM-650/20 с длиной волны излучения $\lambda = 0.65$ мкм и мощностью 20 мВт. В качестве приемника излучения использовался германиевый фототранзистор ФТГ-4, с диапазоном спектральной чувствительности 0.4–1.9 мкм. Определение угла рассеяния θ зондирующего излучения проводилось с помощью лазерной указки, закрепленной на консоли соосно с приемником излучения. Значение угла рассеяния рассчитывалось по показаниям измерительной шкалы и геометрическим характеристикам оптической системы. Приборный комплекс позволяет автоматически регистрировать экспериментальные данные в реальном масштабе времени.

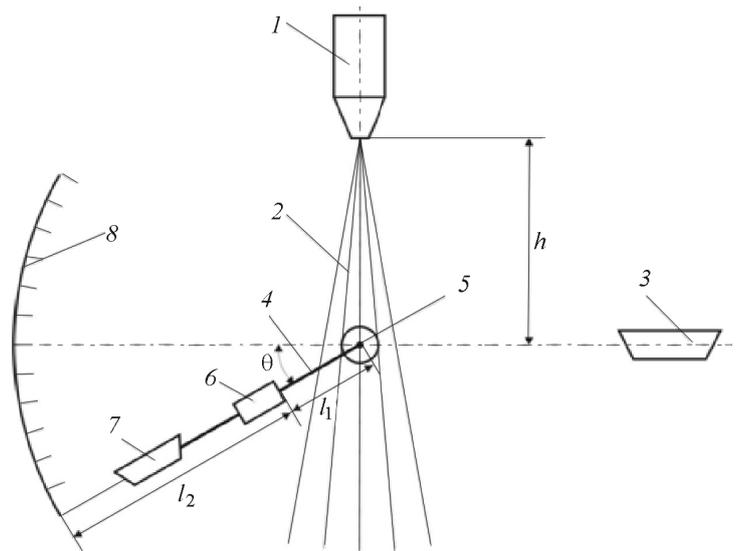


Рис. 2. Система оптической диагностики: 1 — исследуемая форсунка; 2 — факел распыла; 3 — источник зондирующего излучения; 4 — консоль; 5 — ось вращения; 6 — приемник излучения; 7 — лазерная указка; 8 — измерительная шкала

При обработке экспериментальной информации измеренный угол рассеяния (в градусах) переводился в радианы, а полученная из решения обратной задачи функция распределения $f(\beta)$ приводилась к зависимости $f(r)$. В качестве аппроксимирующей функции для $f(r)$ использовалось гамма-распределение:

$$f(r) = ar^\alpha \exp(-br), \tag{3}$$

где a, α, b — параметры распределения.

Интегральная функция $F(r)$ счетного распределения капель рассчитывалась по уравнению:

$$F(r) = \int_0^r f(r)dr. \tag{4}$$

Наряду с функцией распределения для описания дисперсных сред широко используются модальный радиус r_0 (соответствующий максимуму дифференциальной функции счетного распределения), а также осредненные радиусы частиц: r_{10} — среднеарифметический; r_{32} — средний объемно-поверхностный; r_{43} — среднемассовый и др. В общем случае значения осредненных характеристик определяются соотношением [9]:

$$r_{mn} = \left(\frac{\int_0^\infty r^m f(r)dr}{\int_0^\infty r^n f(r)dr} \right)^{\frac{1}{m-n}},$$

где m, n — целые числа, означающие порядок момента функции распределения.

Связь осредненных характеристик частиц с параметрами гамма-распределения определяется формулами [10]:

$$r_{10} = \frac{1 + \alpha}{b}, \quad r_{32} = \frac{3 + \alpha}{b}, \quad r_{43} = \frac{4 + \alpha}{b}. \tag{5}$$

При обработке результатов экспериментов помимо указанных средних размеров определялся модальный размер r_0 капель в факеле распыла, соответствующий максимуму дифференциальной функции счетного распределения $f(r)$. Измеренные индикатрисы рассеяния были использованы также для определения размера капель методом малых углов в предположении о монодисперсности капель.

Исследуемые модели форсунок. Для оценки влияния конструктивных особенностей эжекционной форсунки на дисперсность капель (в основу положен метод предварительной оценки эффективности различных способов распыливания) проведены испытания шести вариантов модельных форсунок (таблица 1).

При выборе параметров форсунок за основу была принята эжекционная форсунка, применяемая в технологии процесса производства дисперсных и высокодисперсных алюминиевых порошков на предприятии ООО "СУАЛ-ПМ". Основные параметры форсуночного узла следующие: диаметр кольцевой щели для газа 10 мм, ширина щели 0.3–0.5 мм, угол конусности крышки 90°, угол конусности стакана 50°, диаметр выходного конуса ниппеля 6 мм, угол конусности 36°, диаметр отверстия в ниппеле 1 мм при длине 2 мм. Канал для подвода жидкости имеет диаметр 4 мм. Форсунка имеет радиальный и тангенциальный вводы в газовую камеру с диаметром каналов 5 мм.

Форсунка А1, схема и общий вид которой приведены на рис. 3, 4 выполнена с газовым каналом в форме конфузора. В форсунке А2 профиль сопла Лавалья для сверхзвукового ускорения газового потока создавался расходящимися поверхностями стакана и крышки корпуса (схема на рис. 5). Критическое сечение сопла в крышке корпуса

Таблица 1. Модели форсунок

A1	Форсунка с газовым трактом в форме конфузора
A2	Форсунка с газовым трактом в форме сопла Лавалья
A3	Форсунка с закруткой газового потока (тангенциальная подача газа)
A4	Форсунка с рассекателем в форме центрального тела
A5	Форсунка с каналом для подачи жидкости, имеющим угловые точки (квадратное сечение)
A6	Форсунка с дополнительным вводом газа в канал подачи жидкости

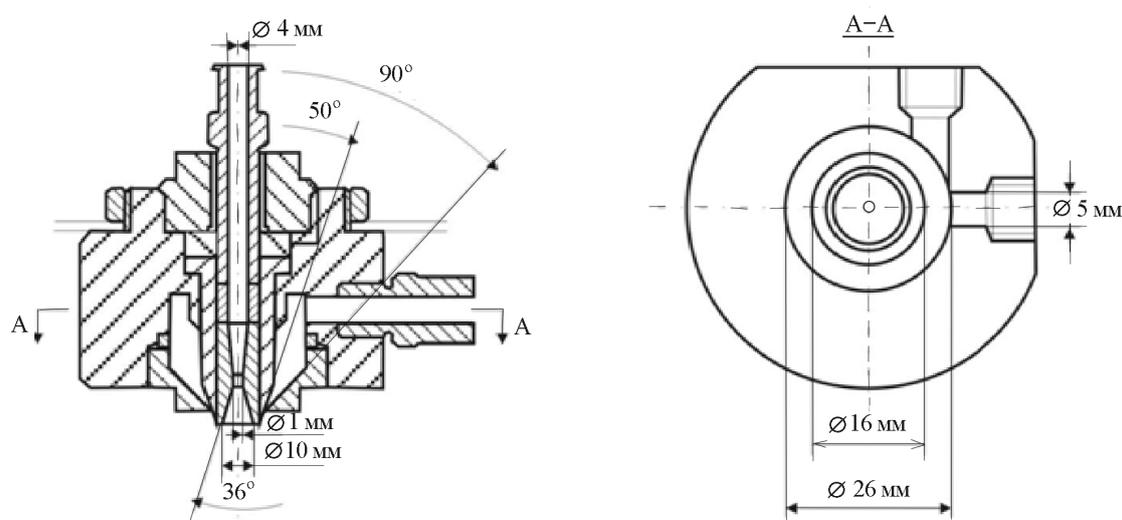


Рис. 3. Схема форсунки А1

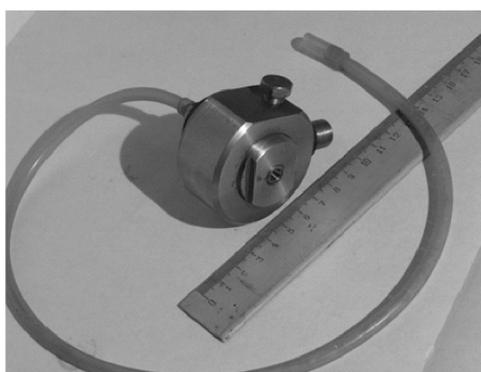


Рис. 4. Общий вид форсунки А1

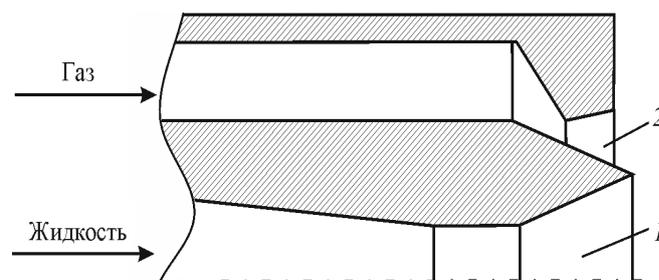


Рис. 5. Схема форсунки А2: 1 — канал подачи жидкости; 2 — канал подачи газа

смещено вверх от торца крышки, а выходная часть спрофилирована под углом 15° . Отношение площадей выходного и критического сечений сопла составляет 3/1. В модельной форсунке А3 закрутка создавалась тангенциальным вводом газа в газовую камеру корпуса форсунки со скоростями до 200 м/с. Форсунка А4 (рис. 6) представляет собой вариант форсунки А1, на выходе которой установлен конусный рассекатель. Крепление рассекателя с помощью V-образного пилона к крышке корпуса позволяет варьировать расстояние от крышки корпуса. Для модели форсунки А5 использован ниппель с каналом для подачи жидкости, имеющим угловые точки в поперечном сечении (квадратное проходное сечение). В форсунке А6 для дополнительного ввода газа в канал подачи жидкости изготовлен специальный стакан с ниппелем. Стакан имеет на внутренней поверхности кольцевую проточку с четырьмя отверстиями, соединяющими его внутренний объем с газовой полостью корпуса. Ниппель на выходном конусе на уровне кольцевой проточки имеет три сквозных отверстия, оси которых направлены к центру основания выходного конуса. Суммарная площадь дополнительных отверстий составляет 10–15% от площади кольцевой струи газа. Фрагмент форсуночного блока форсунки А6 приведен на рис. 7.

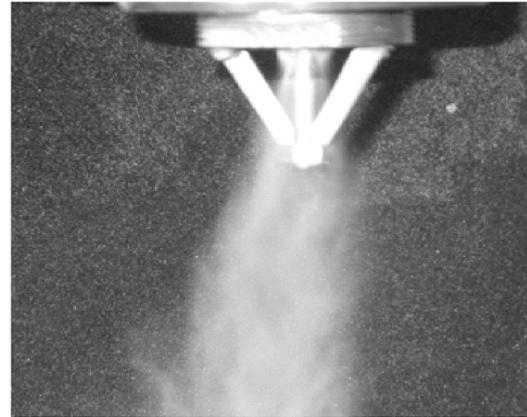


Рис. 6. Факел распыла форсунки А4

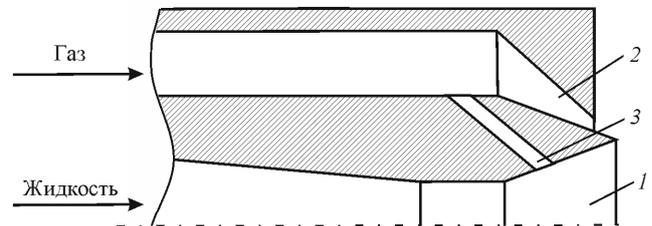


Рис.7. Схема форсунки А6: 1 — канал подачи жидкости; 2 — канал подачи газа; 3 — дополнительный канал для подачи газа

При проведении лазерной диагностики расстояние зоны измерений (от лазерного луча до среза сопла форсунки) выбиралось одинаковым для всех модельных форсунок и составляло 90 мм.

Результаты измерения характеристик дисперсности. В проведенных экспериментах в качестве модельной жидкости использовалась вода, а в качестве газа — сжатый воздух. Условия проведения холодных продувок на пневмогидравлическом стенде приведены в таблице 2.

Для всех исследованных модельных форсунок получены дифференциальные функции счетного распределения капель по размерам (рис. 8). Параметры гамма-распределений (3) для этих функций приведены в таблице 3.

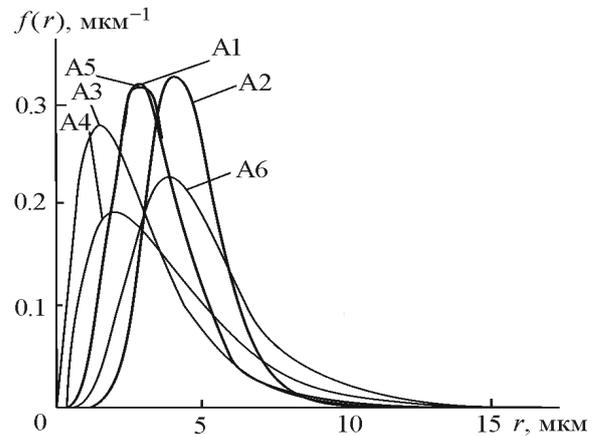


Рис. 8. Дифференциальные функции счетного распределения

Таблица 2. Условия проведения холодных продувок

Форсунка	Давление, МПа	Расход воздуха, м ³ /час	Расход жидкости, г/с
А1	0.3	5.4	1.7
А2	0.3	5.5	1.8
А3	0.3	5.23	1.7
А4	0.15	3.6	1.2
А5	0.3	5.5	1.7
А6	0.15	3.4	1.3

Таблица 3. Параметры дифференциальной функции счетного распределения капель по размерам

Форсунка	a	α	b
A1	0.27	5.1	1.82
A2	$5.0 \cdot 10^{-3}$	10.9	2.73
A3	0.58	1.1	0.79
A4	0.28	0.9	0.53
A5	0.27	5.0	1.79
A6	$4.5 \cdot 10^{-2}$	4.8	1.26

Для всех исследованных форсунок рассчитанные индикатрисы рассеяния хорошо согласуются с измеренными, что свидетельствует об адекватности использованной методики обработки результатов измерений. В качестве типичного примера на рис. 9 приведены измеренная и рассчитанная для полученной функции распределения индикатрисы рассеяния (модельная форсунка А4). Для наглядности индикатрисы рассеяния нормированы на их максимальное значение:

$$\bar{I}(\theta) = \frac{I(\theta)}{I(\theta)_{\max}}$$

Для оценки степени полидисперсности капель в факеле распыла исследованных форсунок была проведена обработка экспериментальных индикатрис рассеяния в предположении монодисперсности капель. При этом гамма-распределение заменялось радиусом монодисперсных капель $r_{\text{мон}}$. Сравнение типичных индикатрис рассеяния (форсунка А3) приведено на рис. 10.

Индикатриса рассеяния, рассчитанная в предположении о монодисперсности капель (кривая 1, рис. 10), существенно отличается от экспериментальной. Это свидетельствует о выраженной полидисперсности капель в факеле распыла.

Для всех исследованных форсунок рассчитанные по уравнениям (5) средние радиусы капель приведены в таблице 4.

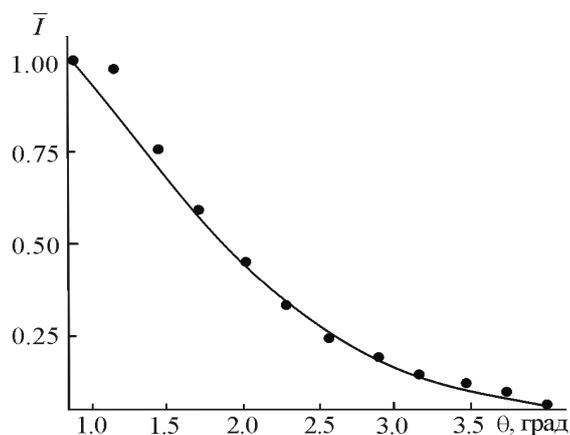


Рис. 9. Экспериментальные (точки) и расчетные индикатрисы рассеяния

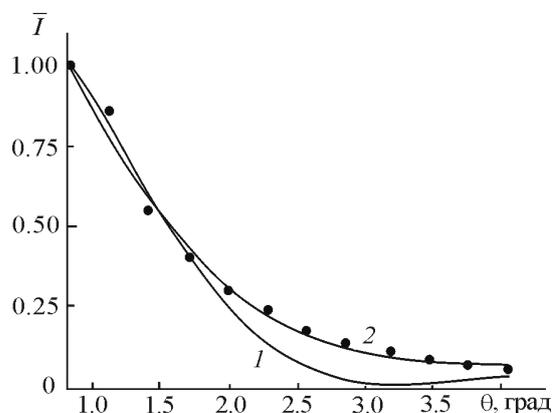


Рис. 10. Экспериментальная (точки) и расчетные индикатрисы рассеяния: 1 — монодисперсные капли; 2 — полидисперсные капли

Таблица 4. Осредненные размеры капель

Форсунка	Полидисперсные капли				Монодисперсные капли
	r_0 , МКМ	r_{10} , МКМ	r_{32} , МКМ	r_{43} , МКМ	$r_{\text{мон}}$
A1	2.8	3.4	4.4	5.0	4.7
A2	4.0	4.4	5.1	5.5	5.1
A3	1.4	2.7	5.2	6.5	7.1
A4	1.8	3.8	7.8	9.8	8.2
A5	2.8	3.4	4.5	5.0	4.8
A6	3.8	4.6	6.2	7.0	7.0

Обсуждение результатов. Анализ влияния конструктивных особенностей эжекционной форсунки на дисперсность капель в факеле распыла проводился с использованием дифференциальной $g(r)$ и интегральной $G(r)$ функций массового распределения капель по размерам [9, 10]:

$$g(r) = r^3 \frac{b^{(\alpha+4)}}{a\Gamma(\alpha+4)} f(r), \quad G(r) = \int_0^r g(r)dr.$$

Графики дифференциальных $g(r)$ и интегральных $G(r)$ функций массового распределения капель по размерам для исследованных форсунок приведены на рис. 11, 12.

Интегральная функция массового распределения $G(r)$ характеризует отношение массы всех частиц, радиусы которых равны и меньше r , к общей массе частиц. В порошковой металлургии для оценки дисперсности частиц обычно используется медианный радиус r_m . Медианный радиус соответствует суммарной доле 50% массы частиц, радиусы которых равны или меньше r_m , от общей массы частиц.

В таблице 5 приведены значения медианных радиусов капель, рассчитанных с использованием полученных функций $G(r)$, в факеле распыла исследуемых форсунок.

Для исследованных форсунок А1–А6 значение медианного радиуса изменяется в достаточно широком диапазоне $r_m = 4.8–8.6$ мкм, что свидетельствует о существенном влиянии конструкции эжекционной форсунки на дисперсность капель в факеле распыла. Наиболее тонкодисперсный факел распыла ($r_m = 4.8$ мкм) получен для форсунок А1 (форсунка с газовым трактом в форме конфузора) и А5 (форсунка с каналом для подачи жидкости, имеющим угловые точки, и с газовым трактом в форме конфузора). Форсунка с рассекателем в форме центрального тела (А4) позволяет получить факел распыла с крупнодисперсными каплями ($r_m = 8.6$ мкм). Использование закрутки газового потока (форсунка А3) и дополнительный ввод газа в канал подачи жидкости (форсунка А6) позволяют регулировать дисперсность образующихся капель.

Рис. 11. Дифференциальные функции массового распределения

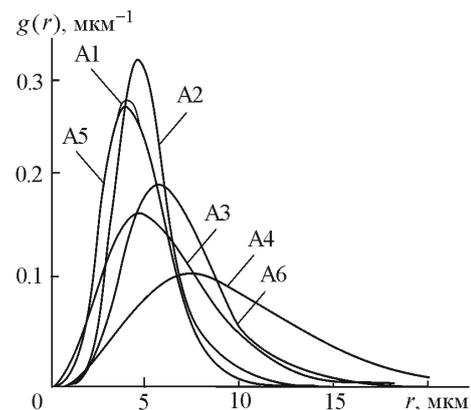


Рис. 12. Интегральные функции массового распределения

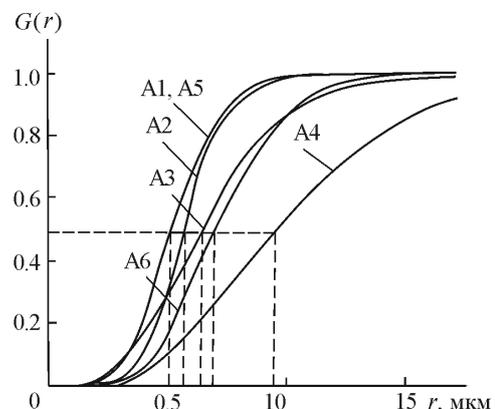


Таблица 5. Медианные радиусы капель

Форсунка	А1	А2	А3	А4	А5	А6
r_m , мкм	4.8	5.5	6.0	8.6	4.8	6.7

Выводы

1. Разработанная методика измерения дисперсности капель в факеле распыла жидкости форсунками позволяет получать адекватные количественные данные о размерах капель.

2. При распыливании жидкости эжекционными форсунками образуется тонкодисперсный факел со средне-массовым радиусом капель в диапазоне 5.0–9.8 мкм. Для всех модельных форсунок получены полидисперсные аэрозоли, характеристики которых соответствуют гамма-распределению частиц по размерам.

3. Размер образующихся капель существенно зависит от конструктивных особенностей эжекционной форсунки, что позволяет регулировать дисперсные характеристики факела распыла.

4. Наиболее тонкодисперсные капли образуются при распыливании форсункой с газовым трактом, выполненным в форме конфузора. Закрутка газового потока и дополнительный ввод газа в канал подачи жидкого компонента приводят к увеличению медианного радиуса капель на 15–40%.

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 1.4082.2011).

Обозначения

a, b — параметры дифференциальной функции счетного распределения капель по размерам; $D(\theta)$ — функция, входящая в ядро обращенного интегрального уравнения (2); $F(r)$ — интегральная функция счетного распределения капель по размерам; $f(r)$ — дифференциальная функция счетного распределения капель по размерам, мкм⁻¹; $G(r)$ — интегральная функция массового распределения капель по размерам; $g(r)$ — дифференциальная функция массового распределения капель по размерам, мкм⁻¹; $H(\beta\theta)$ — ядро обращенного интегрального уравнения (2); I — интенсивность рассеянного излучения; I_0 — интенсивность падающего на частицу излучения; \bar{I} — нормированная интенсивность рассеянного излучения; $\bar{I}(\theta)_{\max}$ — максимальное значение индикатрисы рассеяния; $J_1(\beta\theta)$ — функции Бесселя первого рода первого порядка; $K(\beta\theta)$ — ядро уравнения, определяющего функцию $D(\theta)$; m, n — целые числа, определяющие порядок момента функции распределения; r — радиус частицы (капли), мкм; r_0 — модальный радиус, мкм; r_{10} — среднеарифметический радиус, мкм; r_{32} — средний объемно-поверхностный радиус, мкм; r_{43} — среднемассовый радиус, мкм; r_m — медианный радиус, мкм; r_{mn} — осредненный радиус, мкм; $r_{\text{мон}}$ — радиус монодисперсных капель, мкм; $Y(\beta\theta)$ — функция Неймана; α — параметр дифференциальной функции счетного распределения капель по размерам; $\beta = 2\pi r/\lambda$ — параметр дифракции; Γ — гамма-функция; θ — угол рассеяния излучения (град, радиан); λ — длина волны излучения, мкм; ρ — плотность, кг/м³. Индексы: мон — монодисперсный, m — медиана.

Литература

1. Витман Л. А., Кацнельсон Б. Д., Палеев И. И. *Распыливание жидкости форсунками*. Москва–Ленинград: Госэнергоиздат, 1962.
2. Пажо Д. Г., Галустов В. С. *Распылители жидкости*. Москва: Химия, 1979.
3. Хавкин Ю. И. *Центробежные форсунки*. Ленинград: Машиностроение, 1976.
4. Ничипоренко О. С., Найда Ю. И., Медведовский А. Б. *Распыливание металлических порошков*. Киев: Наукова думка, 1980.
5. Силаев А. Д., Дишман Б. Д. *Диспергирование жидких металлов*. Москва: Metallurgia, 1983.
6. Шифрин К. С., Колмаков И. Б. Вычисления спектра размеров частиц по текущим и интегральным значениям индикатрисы в области малых углов. *Физика атмосферы и океана*. 1967. Т. 3, № 12. С. 1271–1279.
7. Архипов В. А., Бондарчук С. С. *Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания*. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2012.
8. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Боровской И. Г., Шелупанов А. А. Технология прямого поиска при решении задач прикладной математики. *Вычислительные технологии*. 1995. Т. 4, № 10. С. 19–25.
9. Коузов П. А. *Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов*. Ленинград: Химия, 1971.
10. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г., Лернер М. И. Технология получения и характеристики нанопорошков алюминия. *Горный журнал*. 2006. № 4. С. 58–65.