

РАЗДЕЛ 6. ИНЖЕНЕРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И СМЕЖНЫЕ ВОПРОСЫ

Изучение дисперсного состава факела распыла жидкости центробежно-струйной форсунки

д.т.н. проф. Вальдберг А.Ю., Макеева К.П., к.т.н. проф. Николайкина Н.Е.

Университет машиностроения

89104607185, nikols_153@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследования дисперсности состава факела распыла воды центробежно-струйной форсункой. Определены значения средних размеров капель и проведено сопоставление с известными расчетными значениями. Построены графики дисперсного распределения капель и графики сравнения экспериментальных и расчетных значений для среднеарифметического и медианного диаметра. Полученные данные позволяют рекомендовать расчетные зависимости для оценки средних размеров капель при распыле центробежно-струйной форсунки.

Ключевые слова: *форсунка, дисперсный состав, среднеарифметический диаметр, медианный диаметр капель.*

Введение

Для защиты воздушного бассейна от вредных выбросов промышленных производств широко применяются мокрые газоочистные аппараты. Эксплуатационная надежность и эффективность мокрых газоочистных аппаратов в значительной мере обусловлена правильным выбором распыливающих устройств (форсунок).

Форсуночный подвод жидкости широко применяется в различных по назначению видах технологического оборудования. Это делает актуальной задачу разработки новых, удовлетворяющих потребностям промышленности конструкций форсуночных распылителей и методов их расчета. Эффективность технологических процессов зависит от целого ряда параметров, образующихся при распыле капель: дисперсного состава, равномерности распределения капель по сечению скруббера и гидравлического распыла, характеризующего контакт капель с газовым потоком.

Целью данной работы является исследование процесса распыливания капель механической центробежно-струйной форсункой для определения основных качественных и количественных параметров распыла и разработка на их базе надежных методов расчета форсунки.

Постановка задачи

Одной из важнейших характеристик форсунок является размер образующихся при распыливании капель. На практике применяются различные виды параметров, характеризующих средний размер капель: среднеарифметический d_1 , средний поверхностный d_2 , средний объемный d_3 , средний объемно-поверхностный по Заутеру $d_{3,2}$, средний геометрический диаметр d_1 , среднемассовый $d_{4,3}$, медианный по массе d_m и другие [1, 2]. Выбор одного из этих параметров зависит от задачи, решаемой в аппарате с подводом форсуночного орошения. Например, при оценке эффективности осаждения взвешенных частиц базируются на значении среднего линейного диаметра капель d_1 , а при расчете массо- и теплообменных процессов используют значения среднемассового или среднеобъемного диаметра капель d_m или d_3 .

Скорость испарения частиц определяется линейным распределением d_1 , оптическая плотность и осаждение частиц под действием силы тяжести и инерции среднеповерхност-

ным d_2 [3, 4].

Существует различные методы определения характеристик распыла. В настоящей работе приведены результаты исследований гидравлической форсунки электрическим счетно-импульсным методом, основанным на использовании импульсов, возникающих в цепи при ее замыкании каплями жидкости при известной величине зазора между концами игл датчика, помещенного в факел распыла[5].

Исследования и результаты

Данные исследования проводились на экспериментальной установке при распыле капель воды центробежно-струйной форсункой с диаметром сопла 4 мм.

При комнатной температуре давление жидкости перед форсункой изменялось в пределах от 0,2 до 0,6 МПа. Центробежно-струйная форсунка широко применяется в технике газоочистки. Принцип действия форсунки основан на двустороннем подводе жидкости. Часть жидкости подводится тангенциально в камеру закручивания или проходит по винтовым периферийным каналам вставки, образуя вращающийся поток. Другая часть проходит через центральное отверстие вставки, образуя сплошную струю, причем ее диаметр должен быть несколько больше внутреннего диаметра кольцевого потока, вращающегося в сопловом канале. Тогда за счет взаимодействия вращающаяся жидкость будет закручивать центральную струю, создавая единый поток, который на выходе из сопла образует факел в виде сплошного конуса.

На основании экспериментальных данных (определении количества капель в определенном интервале их размера-фракции) были рассчитаны средние диаметры: $d_1, d_2, d_3, d_{3,2}, d_r, d_{4,3}$ – по нижеприведенным формулам при давлении распыла P от 0,2 МПа до 0,6 МПа:

$$d_1 = \sum d_i n_i / \sum i, \quad (1)$$

$$d_2 = \left(\sum d_i^2 n_i / \sum i \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$d_3 = \left(\frac{\sum d_i^3 n_i}{\sum i} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

$$d_{3,2} = \frac{\sum d_i^3 n_i}{\sum d_i^2 n_i} \quad (4)$$

$$\lg d_r = \sum n_i \lg d_i / \sum i, \quad (5)$$

$$d_{4,3} = \frac{\sum d_i^4 n_i}{\sum d_i^3 n_i} \quad (6)$$

где: d_i – текущий размер капли в середине фракции, м;

n_i – число капель диаметром d_i во фракции;

$\sum i$ – общее число капель.

Медианный диаметр капель по массе d_m , полученных в результате экспериментов, рассчитывался по фракциям с построением кривых в вероятностно-логарифмической сетке, характеризующих распределение величины массы капель от их диаметра d_i .

$$d_m = \frac{d_i^3}{6} \cdot \rho_{ж}, \quad (7)$$

где: $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды.

Полученные в результате построения прямые (рисунок 1) свидетельствуют о

логарифмически-нормальном распределении размеров капель при распыле жидкости центробежно-струйной форсункой.

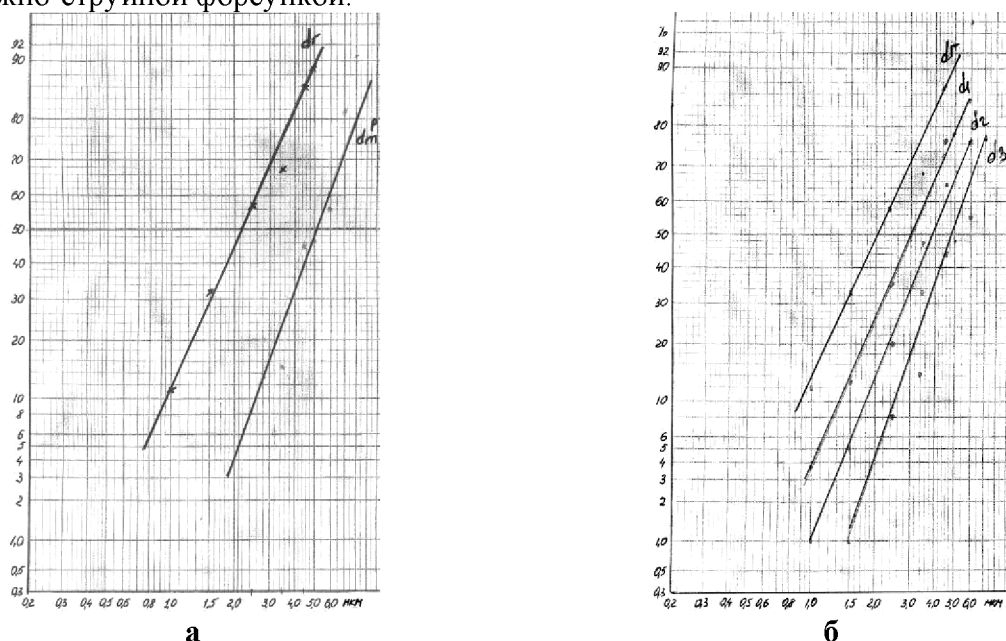


Рисунок 1 – Дисперсное распределение капель в вероятностно-логарифмической системе координат, при давлении $P=0,4$ МПа для d_r, d_m (а) и для d_r, d_1, d_2, d_3 (б)

Результаты расчетов средних диаметров $d_{\text{эсп.}}$ по формулам (1) – (7) сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Средние размеры капель (мкм)

P, МПа	$d_{1\text{эсп}}$	$d_{1\text{расч}}$	$d_{3,2\text{эсп}}$	$d_{3,2\text{расч}}$	$d_{4,3\text{эсп}}$	$d_{4,3\text{расч}}$	$d_{2\text{эсп}}$	$d_{3\text{эсп}}$	$d_{г\text{эсп}}$	$d_{тр\text{расч}}$	$d_{т\text{эсп}}$
0,2	336	334	724	430	1100	691	417	501	264	652	650
0,3	272	260	583	360	889	599	340	408	207	557	590
0,4	248	259	472	317	585	542	302	351	215	501	500
0,5	246	227	465	288	537	502	292	341	213	459	450
0,6	216	204	475	265	647	471	270	326	174	433	445

Было проведено сопоставление полученных экспериментальных данных средних величин капель с рядом наиболее известных зависимостей для их расчета, приводимых в литературе:

- для расчета d_1 [6]:

$$\frac{d_1}{d_c \cdot \sqrt{\mu}} = 385,5 \cdot \text{Re}^{-0,74}, \quad (8)$$

где: d_c – диаметр сопла, м;

μ – коэффициент заполнения сопла форсунки (для исследованной форсунки $\mu = 0,8$);

$\text{Re} = \sqrt{\frac{2P}{\rho_{\text{ж}}}} \cdot \frac{d_c \cdot \sqrt{\mu}}{v_{\text{ж}}}$ – критерий Рейнольдса ;

P – давление распыла, Па;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³;

$\nu_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;

- для расчета $d_{3,2}$ [7]:

$$d_{3,2} = 0,154 \cdot P^{-0,44} \cdot d_c^{0,23}, \quad (9)$$

- для расчета $d_{4,3}$ [8]:

$$\frac{d_{4,3}}{d_c} = \frac{47,8}{A_{\text{вх}}^{0,6} \cdot Re^{0,7} \cdot \Pi^{0,1}}, \quad (10)$$

где: $A_{\text{вх}} = \frac{(R_k - r_{\text{вх}}) \cdot r_c}{n \cdot r_{\text{вх}}^2};$

n – количество входных отверстий;

R_k – радиус камеры форсунки, м;

$r_{\text{вх}}$ – радиус входного отверстия форсунки, м;

$$\Pi_1 = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot \nu_{\text{ж}}^2}{\sigma_{\text{ж}} \cdot d_c},$$

$\sigma_{\text{ж}}$ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

- для расчета d_m формула Лонгвелла [9]:

$$d_m = 947 \cdot 10^4 \cdot d_c \cdot e^{0,7 \cdot 10^7 \cdot \nu_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}} / (P^{0,37} \cdot \sin(\alpha/2)), \quad (11)$$

α – корневой угол факела распыла, град.

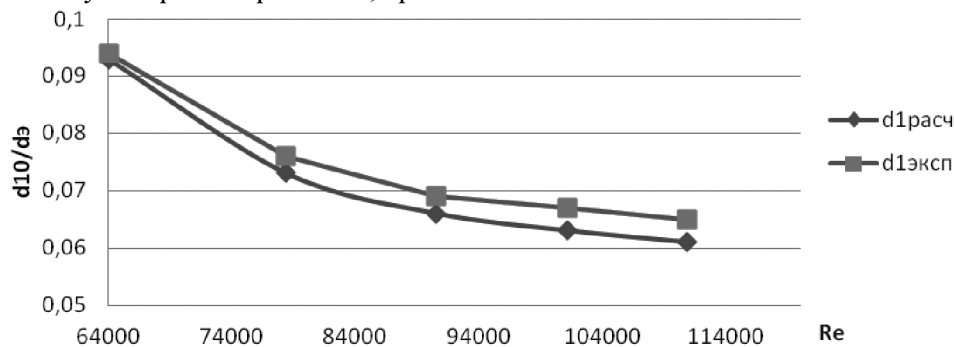


Рисунок 2 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных для среднеарифметического диаметра

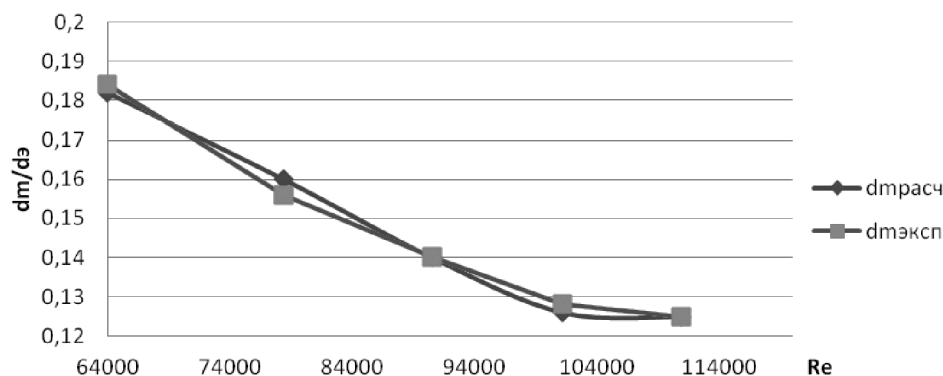


Рисунок 3 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных для медианного по массе диаметра

Результаты расчета по формулам (8-11) $d_{\text{расч}}$ для экспериментальной форсунки также приведены в таблице 1.

На рисунках 2 – 3 приведены сопоставления экспериментальных и расчетных данных для среднеарифметического и медианного диаметра.

Выводы

Наилучшая сходимость экспериментальных и расчетных данных наблюдается для значений d_1 формула (8) и d_m формула (11). Величина расхождения для d_1 не превышала 5%, а для d_m не превышала 3%. Полученные данные позволяют рекомендовать зависимости (8) и (11) для оценки средних размеров капель при распыле жидкости центробежно-струйной форсункой.

Литература

1. Вальдберг А.Ю., Макеева К.П. Анализ дисперсного состава капель, распыливаемых центробежно-струйной форсункой // Химическое и нефтегазовое машиностроение, № 3, 2012. -с.3.
2. Makeeva K. Analysis of the dispersion of droplets, spray centrifugal blasting nozzle /K. Makeeva, A. Valdborg// 20th International Congress of Chemical and Process Engineering, 15th Conference Pres, CD-ROM of Full texts Praha, Czech Republic. 25-29 August 2012.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей – М.: Изд. АН СССР, 1995. - 352с.
4. Шиляев Н.И., Шиляев А.М. Аэродинамика и тепло-массообмен газодисперсных потоков - Томск: Изд. ТГАСУ, 2003. - 272с.
5. Виск М., Даклер А. Новый метод измерения распределения капель электропроводной жидкости в двухфазном потоке/ Достижения в области теплообмена, М: Мир, 1970. - с.39
6. Вальдберг А.Ю., Савицкая Н.М. Обобщенная оценка дисперсности распыла гидравлических форсунок // ТОХТ, т. XXIII, №5, 1989. - с.689-692
7. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетики - М: Энергоатомиздат, 1989. - 206с.
8. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкостей форсунками - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. -264с
9. Лонгвелл Дж.П. Горение жидких топлив – М.: Физматгиз, 1961. - с.343-371

Методы визуализации гидродинамики и нестационарного теплообмена в зернистых средах

чл.-корр. РАН Покусаев Б.Г., к.т.н. доц. Карлов С.П., к.т.н. Некрасов Д.А., Захаров Н.С.
Университет машиностроения
8(499) 267-07-59, nekrasov55@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментов по визуализации полей температур и развития конвективных течений в процессе нестационарного кондуктивного нагрева стенки ячейки, включающей слой шариков засыпки, помещенных в жидкость. Разработана расчётная методика моделирования процесса прогрева ячейки и развития конвекции при различных граничных условиях.

Ключевые слова: нестационарный теплообмен, свободная конвекция, зернистые и пористые среды, метод иммерсионной томографии.

Процессы тепломассообмена в зернистых средах широко распространены в различных аппаратах энергетики, микрореакторах химической и биотехнологической промышленности [1]. Так, применительно к энергетике активно обсуждаются варианты конструктивных решений и схем использования шаровых микротвэлов в водоохлаждаемых реакторах, в том числе реакторах прямоточного типа [2]. К одной из фундаментальных научных и прикладных проблем здесь относится изучение процессов вскипания недогретой жидкости при импульсном тепловыделении в стенке в присутствии зернистого слоя, а также анализ влияния различных факторов на протекающие при этом процессы. К таким факторам, например, относится необ-