

М.К. Безродный д-р техн. наук, профессор; Н.Н. Голяяд; А.Ю. Рачинский;
П.А. Барабаш канд. техн. наук, доцент; А.Б. Голубев канд. техн. наук
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ВЛИЯНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЫ НА ТОНКОСТЬ РАСПЫЛА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК

Исследовано влияние температуры и давления воды на тонкость распыла (величину среднего объемно-поверхностного диаметра капель) для центробежной форсунки в параметрических условиях ее работы и применительно к условиям работы контактного утилизатора теплоты отходящих газов. На основании проведенных опытов получены новые зависимости величины среднего объемно-поверхностного диаметра капель для параметров распыливания жидкости с помощью центробежной форсунки в новом диапазоне изменения избыточного давления и температуры воды перед форсункой. Полученные экспериментальные данные для величины среднего объемно-поверхностного диаметра капель, которые будут в дальнейшем использоваться для расчета реальной межфазной поверхности при исследовании процессов теплообмена в контактных теплоутилизаторах отходящих газов.

Ключевые слова: центробежная форсунка, объемно-поверхностный диаметр капель.

Введение

Одним из перспективных направлений использования центробежных форсунок для распыливания жидкостей являются контактные газожидкостные аппараты капельного типа. Для расчета и проектирования таких аппаратов необходимо знание характеристик факела распыливания. При этом одной из важных характеристик, обеспечивающих эффективное протекание рабочих процессов в аппаратах, является средний диаметр образующихся при распыливании капель жидкости. Известно, что метод усреднения зависит от целей дальнейшего анализа и характера протекающих процессов. В случае изучения процессов теплообмена актуальным является определение неизвестной поверхности контакта фаз. Поэтому в задачах исследования процессов теплообмена, протекающих у поверхности раздела фаз, более представительным и удобным является метод усреднения, позволяющий определить средний объемно-поверхностный диаметр капель [1].

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям влияния входных параметров воды на тонкость распыла центробежных форсунок, которая характеризуется величиной среднего объемно-поверхностного диаметра капель. Имеющиеся в литературе данные по этому вопросу [2-5] относятся, главным образом, к области высоких давлений и характеризуются противоречивостью. В связи с этим, в данной работе проведены систематические исследования указанной характеристики в диапазоне входных параметров воды, характерном для использования распылителей в контактных теплообменных аппаратах.

Полученные экспериментальные данные в дальнейшем будут использоваться при исследовании процессов тепло и массообмена в активной зоне контактного теплоутилизатора капельного типа.

Методика проведения экспериментов

Опыты проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состояла из: систем подачи воздуха и воды, экспериментального участка и измерительной системы.

Система подачи воздуха состоит из вентилятора 3, ротаметра 5 (типа РМ7), заслонки для регулирования расхода воздуха 4 и воздушного трубопровода. Система подачи воды состоит из подводящего трубопровода, регулирующего вентиля 9, водяного фильтра 10, ТОА для нагрева воды 21, манометра 12, ротаметра 11 (типа РМ3), центробежной механической форсунки 7 и сборника воды 13.

Экспериментальный участок состоит из контактной камеры 2, изготовленной из нержавеющей стали в виде вертикального канала диаметром 300 мм и высотой 400 мм. Для удобства проведения исследований корпус контактной камеры был съемным.

В качестве исследуемой форсунки использовалась центробежная механическая форсунка с такими геометрическими параметрами: диаметр сопла $d_c = 0,94$ мм, диаметр входных каналов $d_{вх} = 0,94$ мм, количество входных каналов $n = 2$, длина камеры закручивания $L_k = 4$ мм, диаметр камеры закручивания $D_k = 6$ мм, длина сопла $L_c = 0,4$ мм.

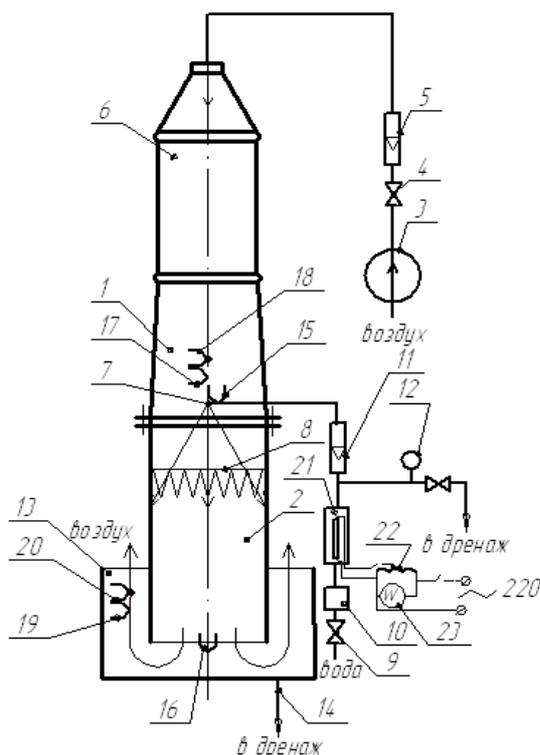


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – камера смешивания, 2 – контактная камера, 3 – вентилятор, 4 – заслонка, 5 – ротаметр, 6 – камера входа, 7 – форсунка, 8 – пробоотборник, 9 – регулирующий вентиль, 10 – водяной фильтр, 11 – ротаметр, 12 – манометр, 13 – сборник воды, 14 – патрубок для отвода нагретой воды, 15, 16 – термопары, 17, 19 – сухие термопары, 18, 20 – мокрые термопары, 21 – ТОВА, 22 – регулятор напряжения, 23 – вольтметр.

Измерительная система состоит с цифрового прибора типа «Овен», цифрового адаптера АС-2, компьютера, термопар 15, 16, 17, 19 для измерения температуры воды и воздуха, а также мокрых термопар 18, 20, пробоотборника 8 и устройства для улавливания капель воды (на рис.1 не показано). Исследования проводились при адиабатических условиях в рабочей камере.

Установка работала следующим образом: водопроводная вода подавалась из водопроводной сети через регулирующий вентиль 9, водяной фильтр 10 в ТОВА 21, где нагревалась до заданной температуры с помощью электрического нагревателя, после чего распылялась на капли форсункой 7 в нижней части камеры смешения 1. Расход воды измерялся ротаметром 11. Вода после прохождения контактной камеры 2 попадала в сборник воды 13, откуда выводилась через патрубок 14. Измерение температуры воды на входе и выходе из рабочего канала проводилось с помощью термопар 15, 16. Показания термопар измерялись прибором типа «Овен» и выводились с помощью адаптера АС-2 на компьютер для регистрации.

Под форсункой устанавливался пробоотборник 8 на заданном расстоянии H от среза сопла форсунки, с помощью которого определялось распределение плотности орошения по сечению факела распыленной жидкости.

Режимные параметры экспериментов изменялись в следующих пределах: расход воды – 0...29,4 кг/ч, температура воды перед форсункой – от 9...51 °С, ее давление – 0...0,6 МПа. Исследования проводились при отключенном вентиляторе 3, т. к. максимальная скорость паровоздушной смеси в контактной камере не превышает 0,1 м/с, при скорости истечения жидкости из форсунки порядка 10 м/с.

Задача экспериментальных исследований заключалась в определении влияния температуры и давления воды на величину среднего объемно-поверхностного диаметра капель d_{3-2} , мкм, распыленной воды для дальнейшего определения поверхности контакта фаз.

Отбор капель из факела распыленной воды осуществлялся на масляное пятно на расстоянии H , мм, от среза сопла форсунки с помощью специального прибора «Ловушки» [6], помещаемой в заданную точку факела. Масляное пятно условно разделялось на четыре равных сектора. В каждом секторе фиксировалась проба капель цифровым фотоаппаратом через микроскоп, которые затем обрабатывались

с помощью компьютера. При этом подсчитывалось количество капель в каждой фракции. Средний диаметр капель в данной фракции определялся через суммарный объем воды в каплях данной фракции и их количество. На основании полученных данных средний объемно-поверхностный диаметр капель определялся как [1]

$$d_{3-2} = \frac{\sum d_i^3 \Delta n_i}{\sum d_i^2 \Delta n_i}, \quad (1)$$

где d_i – средний диаметр капель во фракции, мкм, Δn_i – количество капель данной фракции в пробе.

Анализ и обобщение результатов эксперимента

В литературе [2-5] приведены следующие эмпирические зависимости для расчета средних объемно-поверхностных диаметров капель d_{3-2} при распыливании жидкостей в центробежных форсунках:

$$d_{3-2} = 77,5 p^{-0,458} G^{0,209} \nu^{0,215}, \quad (2)$$

$$d_{3-2} = 9,58 p^{-0,4} G^{0,25} \nu^{0,2} \sigma^{0,6}. \quad (3)$$

Размерности величин, входящих в формулы (2) и (3) согласно [2, 5] следующие: p – в ати, G – в кг/час, ν – в Сст ($1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^6 \text{ Сст}$), σ – в дин/см ($1 \text{ н/м} = 10^3 \text{ дин/см}$), d_{3-2} – в мкм; эти формулы справедливы при $p = 0,5 - 3,0 \text{ МПа}$ [2].

Видно удовлетворительное совпадение расчетных значений d_{3-2} по формуле (2) с опытными данными авторов при $p = 0,6 \text{ МПа}$. Расчетные значения d_{3-2} по этой же формуле для значений $p < 0,6 \text{ МПа}$, а также по формуле (3) (графики 5) нельзя признать удовлетворительными. Таким образом, эмпирическую зависимость (2) можно предложить в качестве расчетной для определения величины d_{3-2} для исследуемой форсунки лишь при давлении воды перед ней $0,6 \text{ МПа}$.

Поэтому было принято решение о получении зависимости для d_{3-2} при значениях давления воды перед форсункой $p = (0,2 \dots 0,6) \text{ МПа}$ и температурах $t = (9 \dots 51)^\circ\text{C}$.

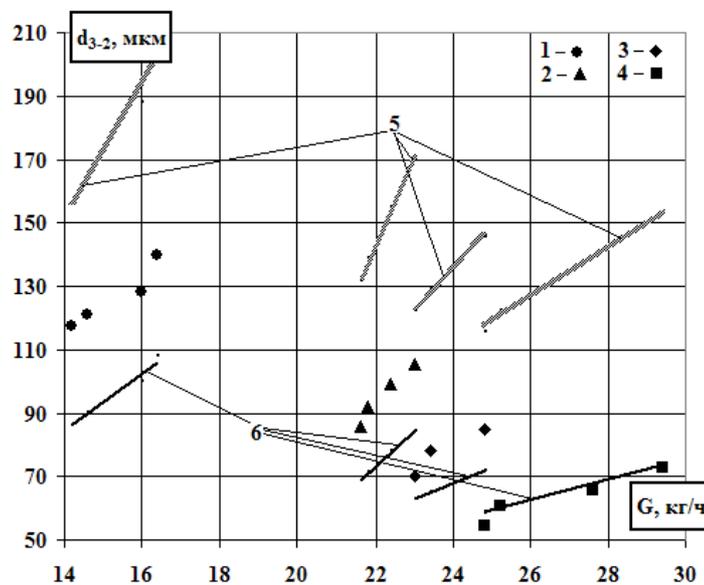


Рис. 2. Значения $d_{3-2} = f(G)$ при $p = (0,2 - 0,6) \text{ МПа}$: 1 – $p = 0,2 \text{ МПа}$, $t = 9, 22, 41$ и 51°C ; 2 – $p = 0,4 \text{ МПа}$, тоже; 3 – $p = 0,5 \text{ МПа}$, $t = 22, 41$ и 51°C ; 4 – $p = 0,6 \text{ МПа}$, $t = 9, 22, 41$ и 51°C ; 5 – расчет по (3); 6 – расчет по (2).

Зависимость величины среднего объемно-поверхностного диаметра капель d_{3-2} от давления воды перед исследуемой форсункой приведена на рис. 3.

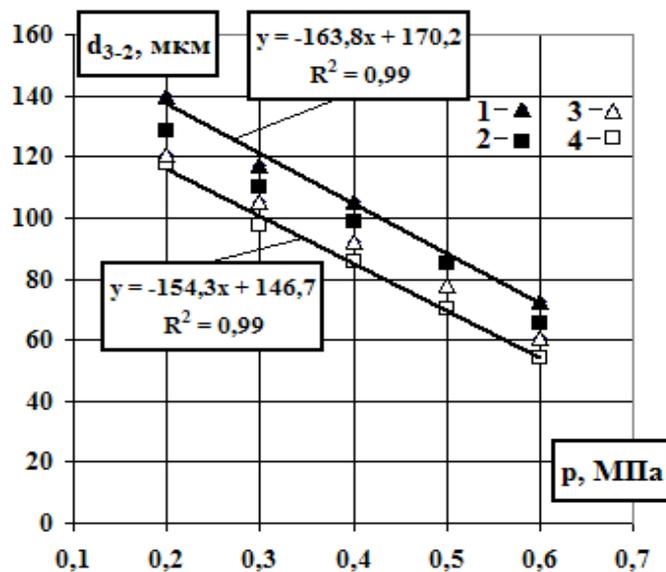


Рис. 3. Зависимость $d_{3-2}=f(p)$ для исследуемой форсунки. 1 – температура воды 9°C; 2 – 22°C; 3 – 41°C; 4 – 51°C.

Видно, что величина d_{3-2} с ростом давления воды существенно снижается, а опытные точки с высокой достоверностью аппроксимируются линейной функцией. Можно заметить также, что $d_{3-2} \sim \delta^{-0,6}$ заметно выше, чем у эмпирических зависимостей (2) и (3) (соответственно минус 0,458 и минус 0,4). Видно также, что экспериментальные значения d_{3-2} расслаиваются по температуре воды перед форсункой. Соответствующие зависимости $d_{3-2} = f(t)$ при разных давлениях приведены на рис. 4.

Качественно характер полученных зависимостей согласуется с эмпирическими уравнениями (2) и (3), так как с ростом температуры воды происходит снижение ее коэффициентов кинематической вязкости ν и поверхностного натяжения σ , влияющих на d_{3-2} прямо-пропорционально.

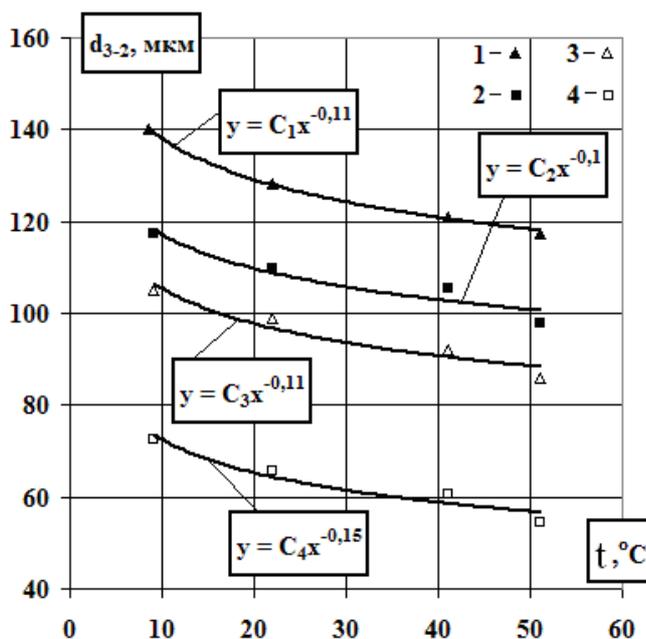


Рис. 4. Зависимость $d_{3-2} = f(t)$: 1 – $p = 0,2$ МПа, $G = 14,2...16,4$ кг/час;
2 – $p = 0,3$ МПа, $G = 17;4...19,8$ кг/час; 3 – $p = 0,4$ МПа, $G = 21,6...23$ кг/час;
4 – $p = 0,6$ МПа, $G = 24,8...29,4$ кг/час.

Кроме того, в соответствии с уравнениями (2) и (3), величина d_{3-2} зависит в положительной степени от расхода воды. В связи с этим был исследован характер зависимости расхода воды через форсунку от ее температуры. Соответствующие зависимости $G = f(t)$ при постоянных давлениях приведены на рис. 5.

На рис.5 четко видна отрицательная степень (от минус 0,04 до минус 0,1) функций, которыми можно аппроксимировать (с достоверностью 0,9) опытные данные. Этот факт удовлетворительно объясняется влиянием сил трения на коэффициент расхода сопла центробежной форсунки, который был впервые установлен Л.А. Клячко [3]. Этот автор показал, что повышение трения в сопле ведет к уменьшению крутки потока и увеличению коэффициента расхода форсунки. Следовательно, увеличение температуры воды должно приводить к уменьшению величины G , а значит, и среднего диаметра капель d_{3-2} .

Обобщение экспериментальных данных по средним диаметрам капель впервые было предпринято в работе [4]. При этом получена зависимость $d_{4-3} / d_{\text{э}} = \text{const} / \text{Re}^{0,59}$, где $d_{\text{э}} = \sqrt{\mu} \cdot d_c$ – эквивалентный диаметр центробежной форсунки, удовлетворительно обобщающая опытные данные по средним массовым диаметрам капель d_{4-3} при распыливании топлива форсунками большой производительности в области высоких давлений. Анализ результатов обобщения [4] показал, что средний диаметр распыленных капель зависит от перепада давлений, расхода и вязкости жидкости и не зависит от конструкции форсунки. Тем не менее, эта зависимость была получена в иных условиях и не может быть использована для обобщения наших данных.

В общем случае, по аналогии с работами [7, 8], если положить, что $d_{3-2} = f(d_c, W_Y, \rho, \nu, \sigma, \Delta p)$, то, используя теорию подобия, можно получить, что:

$$d_{3-2} / d_c = f(\text{Re}, \text{We}, \text{Eu}), \quad (4)$$

где $\text{Re} = \frac{W_Y d_c}{\nu}$; $\text{We} = W_Y \sqrt{d_c} \frac{\rho}{\sigma}$; $\text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho W_Y^2}$; $W_Y = \frac{4G}{\pi d_c^2 \rho}$; Δp - перепад давления потока воды на форсунке.

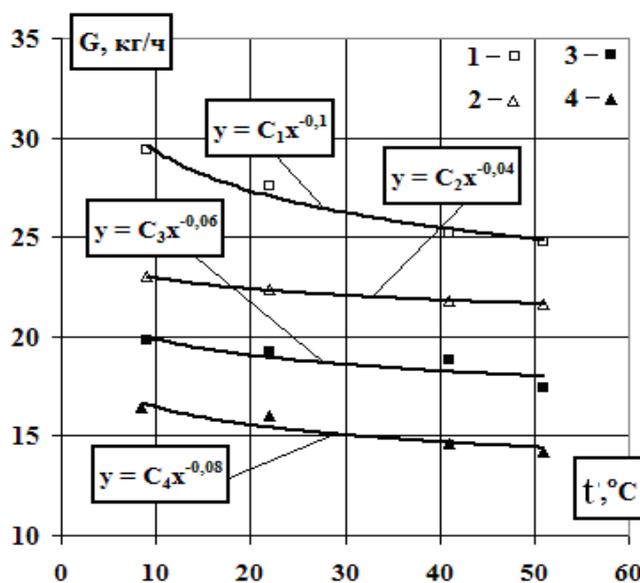


Рис. 5. Зависимость $G = f(t)$. 1 – $p = 0,6$ МПа, $d_{3-2} = 54,4 \dots 72,6$ мкм;
 2 – $p = 0,4$ МПа, $d_{3-2} = 85,9 \dots 105,2$ мкм; 3 – $p = 0,3$ МПа, $d_{3-2} = 97,7 \dots 117,3$ мкм;
 4 – $p = 0,2$ МПа, $d_{3-2} = 117,5 \dots 140$ мкм.

Выбрав из наших опытов точки для которых $\text{Re We} \approx \text{const}$ можно получить с достоверностью $R^2 = 0,98$:

$$d_{3-2} / d_c = 0,061 \text{Eu}^{0,39}. \quad (5)$$

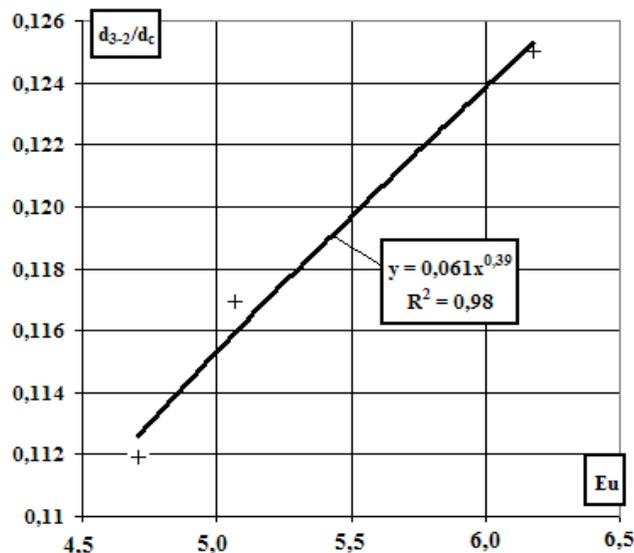


Рис. 6. Зависимость $d_{3-2} / d_c = f(Eu)$ при $ReWe \approx const$.

С учетом зависимости (5) весь массив экспериментальных данных представлен на рис. 7 в виде зависимости $A = f(We \times Re)$, где $A = \frac{d_{3-2}}{0,061Eu^{0,39}d_c}$. Опытные данные удовлетворительно (с достоверностью $R^2 = 0.88$) обобщаются уравнением:

$$\frac{d_{3-2}}{d_c} = 35,7Eu^{0,39}(ReWe)^{-0,52}. \quad (6)$$

Максимальное отклонение опытных точек от обобщающей зависимости не превышает 18 %. Зависимость (6) справедлива при избыточном давлении воды перед форсункой $p = (0,2 - 0,6)$ МПа и ее температуре $t = (9 - 51)^\circ\text{C}$.

Зона $A < 1$ соответствует малым перепадам давления на форсунке и большим значениям d_{3-2} , что ведет к уменьшению удельной межфазной поверхности, а в зоне $A > 1$ наоборот. При выборе оптимального значения A , для контактного теплоутилизатора необходимо проводить технико-экономическое обоснование, с учетом расхода энергии на диспергирование жидкости и металлоемкости утилизатора.

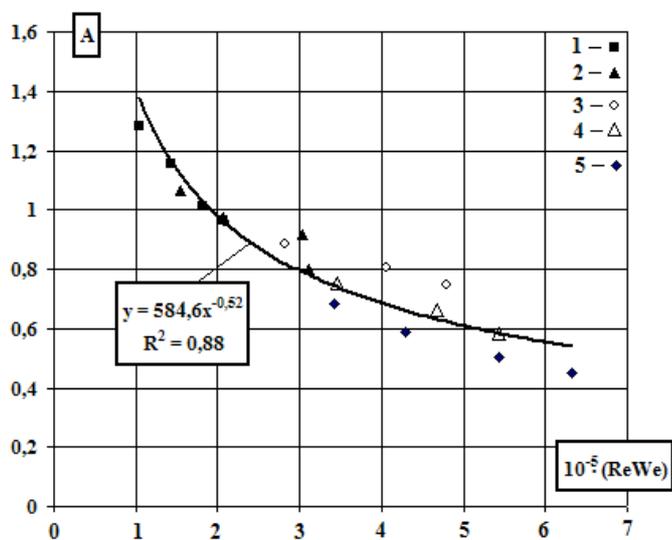


Рис. 7. Обобщение экспериментальных данных. 1 – $p = 0,2$ МПа, $t = (8,5 - 51)^\circ\text{C}$;
 2 – $p = 0,3$ МПа, $t = (9 - 51)^\circ\text{C}$; 3 – $p = 0,4$ МПа, $t = (9 - 51)^\circ\text{C}$;
 4 – $p = 0,5$ МПа, $t = (22 - 51)^\circ\text{C}$; 5 – $p = 0,6$ МПа, $t = (9 - 51)^\circ\text{C}$.

Выводы

На основании проведенных исследований получены экспериментальные зависимости для параметров распыливания жидкости с помощью стандартной центробежной форсунки, в новом диапазоне изменения избыточного давления воды перед форсункой $p = (0,2 - 0,6)$ МПа и ее температуры $t = (9 - 51)^\circ\text{C}$.

1. Установлен характер влияния входных параметров воды (давления, температуры, расхода) на величину среднего объемно-поверхностного диаметра капель, образующихся при распыливании.

2. Получена обобщающая зависимость (6) для расчета величины среднего объемно-поверхностного диаметра капель при распыливании жидкости на исследуемой форсунке.

3. Полученные данные будут использованы в дальнейшем при расчете реальной межфазной поверхности при исследовании процессов тепломассообмена в контактных утилизаторах теплоты отходящих газов.

Список литературы

1. Д.Г. Пажу, В.С. Галустанов. Основы техники распыливания жидкостей. - М.:Химия. - 1984. - 255с.
2. Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев. Распыливание жидкости форсунками /Под ред. С.С. Кутателадзе. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1972. - 384 с.
3. Блох А.Г., Кичкина Е.С. О коэффициентах расхода и углах конусности факела // Теплоэнергетика, 1957. - № 10. - С.35 - 41.
4. Хавкин Ю.И. Центробежные форсунки. - Л.: Машиностроение. - 1976. - 168 с.
5. Баранаев М.К., Теняков В.И. Размер капель центробежной форсунки в широком диапазоне свойств диспергируемой жидкости // Механика жидкости и газа. - 1970. - № 3. - С. 155 - 162.
6. Дикий М.О., Соломаха А.С., Петренко В.Г., Барабаш П. О. Пристрій для вловлювання крапельної рідини з газового потоку. Патент на корисну модель України №81815 від 10.07.2013р.
7. Лебедев П.Д., Верба М.И., Леончик Б.И. Некоторые закономерности распыливания перегретой жидкости // Известия ВУЗов. Энергетика, 1959.- № 10. - С. 76 - 83.
8. В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. Теплопередача. - М.: Энергия. - 1975. - 488 с.

УДК 536.423.4

М.К. Безродний, д-р техн. наук, професор; **М.Н. Голіяд**; **А.Ю. Рачинський**;

П.О. Барабаш, канд. техн. наук, доцент; **О.Б. Голубев** канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ВЛИВ ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОДИ НА ТОНКІСТЬ РОЗПИЛУ ВІДЦЕНТРОВИХ ФОРСУНОК

Досліджено вплив температури і тиску води на тонкість розпилу (величину середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель) для відцентрової форсунки в параметричних умовах її роботи та за умов роботи, характерних для контактної утилізатора теплоту відхідних газів. На основі проведених дослідів отримано нові залежності величини середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель для параметрів розпилу рідини за допомогою відцентрової механічної форсунки в новому діапазоні зміни надлишкового тиску і температури води перед форсункою. Отримані експериментальні дані для величини середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель, які будуть в подальшому використовуватись для розрахунку реальної міжфазної поверхні при дослідженні процесів тепломасообміну в контактних теплоутилізаторах відхідних газів.

Ключові слова: відцентрова форсунка, об'ємно-поверхневий діаметр крапель.

M. Bezrodny, N. Goliyad, A. Rachinskiy, P. Barabash, A. Golubev
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

INFLUENCE OF INPUT PARAMETERS OF WATER ON A THINNESS OF SPRAY OF CENTRIFUGAL ATOMIZERS

Influence of temperature and pressure of water on a thinness of spray (magnitudes of average volumetric-surface diameter of drops) for the centrifugal atomizers in parametric conditions of its work with reference to working conditions of contact heat utilizer of waste gases are investigated. On the basis of experiments were obtained new dependence of the magnitudes of average volumetric-surface diameter of drops for the parameters of the atomization of liquid by using centrifugal atomizer in a new range of change of superfluous pressure and water temperature before an atomizer. The experimental date obtained for the magnitudes of average volumetric-surface diameter of drops which then will be used to calculate interfacial area in the study of heat and mass transfer processes in the contact heat utilizers of waste gases.

Key words: centrifugal atomizers, the volume-surface diameter of the droplets.

1. D.G. Pazhi, V.S. Galustov. Basic techniques of atomization liquids. - M.:Khimiya. - 1984. – 255p. (Rus.)
2. L.A. Vitman, B.D. Katsnel'son, I.I. Paleyev. Atomization of liquid by nozzles / Pod red. S.S. Kutateladze. – M.-L.: Gosenergoizdat, 1972. – 384 p. (Rus.)
3. Blokh A.G., Kichkina Ye.S. On the coefficients of flow and taper angles of the torch // Teploenergetika, 1957. - № 10. – P.35 – 41. (Rus.)
4. Khavkin YU.I. Centrifugal atomizer. – L.: Mashinostroyeniye. – 1976. – 168 p. (Rus.)
5. Baranayev M.K., Tenyakov V.I. The droplet size of the swirler in a wide range of properties of the dispersible liquid // Mekhanika zhidkosti i gaza. – 1970. - № 3. – P. 155 – 162. (Rus.)
6. Dikiy N.A., Solomakha A.S., Petrenko V.G., Barabash P.A. A device for catching drops of liquid from a gas stream. Patent na korysnu model' Ukrainy №81815 vid 10.07.2013r. (Ukr.)
7. Lebedev P.D., Verba M.I. M.K., Leonchik B.I. Some regularities of superheated liquid atomization // Izvestiya VYZov. Energetika, 1959. - № 10. – P.76 – 83. (Rus.)
8. V.P. Icachenko, V.A. Ocipova, A.C. Cykomel. Heat transfer. – M.: Energiya. – 1975. – 488 p. (Rus.)

Надійшла 18.11.2013

Received 18.11.2013

УДК 621.311

В.П. Калинин, канд. техн. наук, доцент; М.Т. Буравлёва
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПЛАНИРОВАНИЮ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГИОНОВ УКРАИНЫ

Целью данной работы является повышение эффективности использования потенциала возобновляемых и нетрадиционных источников энергии (ВНИЭ) регионов Украины за счет использования комплексного подхода. Комплексный подход должен рационально подходить к вопросу выбора проектов на базе ВНИЭ, обеспечивать долгосрочный прогноз показателей для определения основных тенденций развития отрасли и региона. Подход обеспечивает обоснованный выбор проектов для первоначального внедрения, учитывая экономические, экологические, технологические критерии из набора возможных альтернатив. Включает составляющую анализа рисков энергетических предприятий на базе ВНИЭ и приоритетные приемы управления ними. Результаты долгосрочного прогнозирования для Украины подтверждают мировые тенденции развития энергетической отрасли, а именно увеличение спроса на энергию, рост генерации традиционными и возобновляемыми источниками энергии. Комплексный подход к анализу проектов возобновляемой энергетики облегчает и ускоряет процесс принятия решений выбора проектов на базе ВНИЭ, сокращает возможные потери за счет учета рисков.

Ключевые слова: возобновляемые и нетрадиционные источники энергии, комплексный подход, долгосрочное прогнозирование, приоритетные технологии генерации энергии, оценка рисков.

Вступление. Мировые тенденции рационального использования энергии и забота об окружающей среде обуславливают перспективность энергосбережения, повышения уровня энергоэффективности, а также использования возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. Вопрос энергосбережения и энергоэффективности является актуальным для всех стран, вне зависимости от уровня развития экономики страны, их решение влияет на конкурентоспособность продукции, энергетическую независимость и экологическую безопасность. Развитие крупных тепловых, атомных и гидроэлектростанций со все большими единичными мощностями генерирующего оборудования не могло не оказать отрицательного, часто необратимого влияния на экологию, как отдельных регионов, так и

© Калинин В.П., Буравлёва М.Т., 2013