

Ан. А. Овчинников, Ю. Ф. Коротков, А. Н. Николаев

О ДИСПЕРГИРОВАНИИ ЖИДКОСТИ В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ РЕАКТОРЕ УСТАНОВКИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ГАЗА

Ключевые слова: диспергирование жидкости, распылительный реактор, десульфурация газа.

Рассмотрены закономерности движения испаряющейся капли и определен максимальный диаметр капель при работе реактора в режиме полного испарения.

Keywords: dispersing the liquid, spray reactor, desulfurization of gas.

Regularities evaporating droplet motion and determine the maximum diameter of the droplets in the reactor in the full evaporation.

В последнее время на ряде объектов промышленной энергетики наметилась тенденция отхода от дорогостоящих видов топлива (газ, мазут) и перехода на традиционные для энергетики и более дешевые твердые виды топлива: уголь, сланец, торф. Такой переход ведет к снижению производственных издержек, но связан с реконструкцией топочных устройств и систем очистки дымовых газов [1]. При сжигании твердых топлив из топок котлов вместе с дымовыми газами, частицами золы и несгоревшего топлива выносятся большое количество оксидов серы [2]. Так например, современная ТЭС мощностью 2,4 млн. кВт расходует до 20 тыс. т. угля в сутки и выбрасывает в атмосферу 680 т. SO_2 и SO_3 при содержании серы в топливе всего 1,7% и 120-240 т. золы и пыли. Исследования показали [3], что вблизи мощной электростанции, выбрасывающей в сутки 280÷360 т. оксидов серы, их максимальная концентрация с подветренной стороны даже на расстоянии 1÷2 км составляет 0,22÷2,8 мг/куб.м. В этих условиях проблема очистки больших объемов газов от двуокиси серы становится все более актуальной.

Высокая степень очистки газов от оксидов серы может быть достигнута в процессе их десульфурации щелочными растворами, например, раствором карбоната натрия. Указанный процесс удобно проводить в полых распыливающих реакторах [4], конструкция которых и принцип действия аналогичны распылительным сушилкам.

Распыление жидкости в реакторе целесообразно осуществлять ротационными механическими распылителями с дисковыми рабочими элементами с непосредственной подачей жидкости и соударением (пересечением) двух факелов [5]. Промышленные варианты таких дисковых рекомендованы фирмой «Ниро-Атомайзер» и позволяют получить тонкий и широкий распыл жидкостей. Отличительной особенностью дисковых распылителей является возможность их работы с загрязненными жидкостями, простота регулирования геометрии факела, плотности орошения и дисперсного состава капель путем изменения скорости вращения диска, перераспределения расхода жидкости по соударяющимся факелам.

Распылительные реакторы обладают малым гидравлическим сопротивлением, реакционный процесс характеризуется простотой и низкой стоимостью. Обычно реактор работает в режиме полного испарения (по сухому циклу), что с одной стороны снимает вопрос об утилизации шламовых вод, а с другой позволяет использовать его даже на стадии подготовки и кондиционирования дымовых газов перед системами сухого пылезолоулавливания. Сухой сульфат/сульфит натрия, удаляемый из реактора и системы пылеочистки, может быть регенерирован в карбонат натрия для повторного использования в реакторе.

Если распылительный реактор используется на стадии предварительной подготовки газа к пылезолоулавливанию, то процесс десульфурации будет сопровождаться еще целым рядом процессов, которые обычно называют кондиционированием газов. Это процессы охлаждения высокотемпературных дымовых газов за счет испарения раствора, их увлажнение и частичная пылеочистка за счет конденсационного эффекта, инерционной сепарации и агрегирования частиц на каплях раствора. Очевидно, что эффективность вышеуказанных процессов различна и существенным образом зависит от степени распыла раствора в реакторе. Известно, что в распылительных сушилках при мелкодисперсном распылении жидкости ($\delta=1\div50$ мкм.) происходит практически мгновенное испарение жидкой фазы [6]. При этом время жизни капли ничтожно мало, а, следовательно, мала эффективность сорбционного процесса. С другой стороны, в полых распылительных скрубберах, где $\delta=100\div500$ мкм., даже при обработке высокотемпературных газов ($t>1000^\circ\text{C}$) полного испарения жидкости не происходит [7]. В данной работе предлагается способ оценки максимального диаметра исходных капель жидкости при работе реактора в режиме полного испарения.

Рассматривался одномерный случай движения капли вдоль продольной оси реактора. Предполагалось, что диаметр капель раствора в реакторе должен составлять 25÷300 мкм., а скорость их относительного движения не превосходит 5 м/с. Тогда предельное значение числа Рейнольдса для капли не превышает 300. В работе [8] показано, что

при числах Re относительного движения меньших 1000 перенос массы в капле происходит преимущественно за счет диффузии, циркуляционные потоки в капле отсутствуют и последнюю можно рассматривать как недеформируемую сферическую частицу. При этом время релаксации капли невелико и значительно меньше времени пребывания ее в реакторе. Поэтому процесс движения капли считался квазистационарным.

Из равенства сил тяжести и аэродинамического сопротивления, действующих на каплю, вытекает зависимость для скорости свободного осаждения капли

$$v = \sqrt{\frac{4 \rho_p - \rho}{3} \frac{g \delta}{\rho c_x}} \quad (1)$$

где ρ_p , ρ - плотности капли и газа; c_x - коэффициент лобового сопротивления капли; g - ускорение свободного падения; δ - текущий диаметр капли.

Процесс испарения капель в полых вихревых аппаратах в общем случае можно представить состоящим из двух стадий. На первой стадии происходят одновременно как испарение капель, так и изменение их температуры. Если средняя температура жидкости в капле меньше температуры мокрого термометра, то поток тепла, поступающий от окружающего высокотемпературного газа, частично затрачивается на испарение, а частично - на нагрев жидкости в капле. В том случае, если температура капли превышает температуру мокрого термометра, избыточное тепло, которым обладает капля, затрачивается на испарение, а жидкость в капле охлаждается. В любом случае изменение температуры капли продолжается до тех пор, пока она не станет равной температуре мокрого термометра во всем объеме капли. После этого начинается вторая стадия, когда все тепло, подводимое к капле от газа, тратится исключительно на испарение жидкости. В тех случаях, когда начальная температура капель незначительно отличается от температуры мокрого термометра или когда температура газа превышает 350-400°C, изменением температуры капель можно пренебречь и считать, что все тепло, подводимое к каплям, тратится на испарение жидкости [9].

В рамках данного исследования считалось, что все тепло, передаваемое высокотемпературным газом капле за счет конвекции

$$dQ = \alpha F(t - t_p) dt,$$

расходуется на испарение жидкости

$$dQ = r dm = \frac{1}{2} \pi \rho_p r \delta^2 d\delta,$$

а тепловой поток к поверхности капель, связанный с излучением газа и водяного пара, пренебрежимо мал. Из уравнения теплового баланса было получено уравнение, определяющее уменьшение диаметра испаряющейся капли во времени

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{2\alpha}{\rho_p r} (t - t_p), \quad (2)$$

где α - коэффициент теплоотдачи к капле; t_p , t - температуры газа и капли; r - удельная теплота парообразования; τ - время движения капли.

Дифференциальное уравнение (2)

дополнялось начальными условиями вида

$$\tau = 0, \delta = \delta_0 \quad (3)$$

где δ_0 - исходный диаметр капли.

Зависимости (1)-(3) полностью определяли постановку задачи о движении испаряющейся капли в реакторе.

При задании значений кинематических коэффициентов и с целью получения аналитических решений, для максимального диаметра капель рассмотрено два частных случая.

1. *Безынерционное, вязкое движение капли* ($Re \ll 1$). В этом случае сопротивление капли подчиняется закону Стокса, а тепловой поток к капле лимитирован теплопроводностью газа

$$c_x = \frac{24}{Re}; Nu = \frac{\alpha \delta}{\lambda} = 2, \quad (4)$$

где $Re = \frac{V \delta}{\nu}$ - число Рейнольдса капли, λ , ν -

коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости газа.

Интегрированием уравнения (2) при начальных условиях (3) с учетом (4) был определен характер изменения диаметра испаряющейся капли

$$\delta^2 = \delta_0^2 - \frac{8\lambda}{\rho_p r} (t - t_p) \cdot \tau \quad (5)$$

и записано условие полного испарения капли на выходе распылительного реактора

$$\tau = \tau_0; \delta = 0; \delta_0 = \delta_{\max},$$

откуда с учетом (5) была получена зависимость для максимально возможного диаметра капли

$$\delta_{\max}^2 = \frac{8\lambda(t - t_p)}{\rho_p r} \tau_0, \quad (6)$$

где τ_0 - время пребывания капли в реакторе.

Определение времени пребывания капли в реакторе проводилось, исходя из величины пути, пройденного каплей,

$$H = \int_0^{\tau_0} v(\tau) d\tau \quad (7)$$

и скорости движения капли (1)

$$v = \frac{1}{18} \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \frac{g}{\nu} \delta^2. \quad (8)$$

Окончательно, для времени полета капли в реакторе и размера капли, полностью испаряющейся за это время, были получены следующие зависимости, отражающие их связь с теплофизическими и геометрическими параметрами процесса:

$$\tau_0^2 = \frac{9H \cdot v \cdot \rho_p \cdot r \cdot \rho}{4 \cdot g \cdot \lambda \cdot (t - t_p) \cdot (\rho_p - \rho)}; \quad (9)$$

$$\delta_{\max}^4 = \frac{288H\lambda(t - t_p)\rho\nu}{g\rho_p r(\rho_p - \rho)}. \quad (10)$$

Следует отметить, что аналогичная зависимость для предельного диаметра капли,

отвечающего условию полного испарения, была получена в [10], где исследовался процесс осаждения пыли диспергированной водой.

2. *Инерционное обтекание капли* ($1 < Re \leq 300$). Данному диапазону чисел Рейнольдса соответствует переходная область на кривой Релея гидравлического сопротивления сферической частицы [10]. Коэффициент сопротивления тел в этой области зависит от множества факторов: формы тела, состояния вещества, шероховатости поверхности, сопутствующих процессов нагрева, испарения, коалесценции, ускорения и т.д. Важно, что зависимость коэффициента сопротивления от числа Re в этой области может быть и обычно представляется в виде степенной зависимости

$$c_x = bRe^n, \quad (11)$$

коэффициенты которой определяются по условию наилучшей аппроксимации экспериментальных данных. Далее этот факт был использован с целью упрощения решения. При этом, безусловно, учитывалось, что сопротивление сферы в переходном режиме изменяется от закона Стокса для чисто вязкого обтекания частицы до закона Ньютона, справедливого в автомодельном режиме, т.е. величина показателя степени n должна принадлежать интервалу $[-1; 0]$.

Аналогичная зависимость была использована для расчета коэффициента теплоотдачи на поверхности капли

$$Nu = \alpha Re^m. \quad (12)$$

Обзор экспериментальных данных по тепло- и массоотдаче при испарении капли в потоке газа, выполненный авторами [13], а также многочисленные данные по теплоотдаче в дисперсных системах, приведенные в монографии [11], подтверждают возможность использования зависимости (12) при аппроксимации экспериментальных данных. При этом показатель степени m обычно изменяется в диапазоне от 0,5 (по данным Фресслинга) до 0,67 (по данным Соколовского и Тимофеевой) [13]. Следует особо подчеркнуть, что оба значения получены при обработке опытных данных по испарению капель воды в воздухе.

Зависимости для коэффициентов переноса (11), (12) были использованы для определения относительной скорости движения капли

$$V^{2-n} = A\delta^{n+1}, \quad (13)$$

величины изменения размера капли в процессе ее движения и испарения

$$\delta^I = \delta_0^I - B \cdot \tau, \quad (14)$$

и записи условия работы распылительного реактора в режиме полного испарения

$$\tau_0 = \frac{\delta_{\max}^I}{B},$$

где

$$A = \frac{4}{3} \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \frac{g}{bv^n}; B = \frac{6m}{2-n} \frac{a}{\rho_p r v^m} A^{\frac{m}{2-n}}; I = \frac{3m}{2-n}.$$

Интегральное уравнение (7) для случая инерционного движения капли принимает вид

$$H = \int_0^{\tau_0} A^{\frac{1}{2-n}} [\delta_0^I - B \cdot \tau]^k d\tau, \quad (16)$$

$$\text{где } k = \frac{n+1}{1(2-n)}.$$

Нетрудно видеть, что при целочисленных значениях показателя степени k ($k=1, 2, 3, \dots$) уравнение (16) допускает аналитическое решение относительно времени жизни капли в распылительном реакторе. Были рассмотрены два случая: $k=1$ и $k=2$. Их реализация привела к дополнительным ограничениям на показатели степени m и n в уравнениях для коэффициентов переноса

$$\begin{aligned} k=1, m+n=1, \\ k=2, 6m+5n=7 \end{aligned} \quad (17)$$

В случае $k=1$ целесообразно считать $m=0,6$, $n=0,4$. Тогда в качестве зависимости (12) можно использовать известную формулу Мак-Адамса [11]

$$Nu = 0,37 Re^{0,6}, \quad (18)$$

полученную им в результате обобщения большого числа экспериментальных данных по теплообмену в дисперсных потоках и справедливую в широком диапазоне чисел Рейнольдса ($Re=17 \div 70000$). Аппроксимация кривой Релея зависимостью вида

$$c_x = bRe^{-0,4}, \quad (19)$$

выполненная в рамках данного исследования, показала приемлемость данной зависимости при $b=6,3$ для описания опытных данных по гидравлическому сопротивлению сферы в диапазоне $Re=10 \div 300$.

В случае $k=2$ показатели степени m и n принимались равными 0,67 и 0,6 соответственно. Тем самым были реализованы возможности известных зависимостей Клячко [11] и Стьюарта-Лайфута [10]

$$Nu = 0,32 Re^{0,67}; c_x = 18,5 Re^{-0,6}. \quad (20)$$

При задании коэффициентов переноса формулами (20) искомые зависимости для времени пребывания капли в реакторе и предельно допустимого диаметра капли имели следующий окончательный вид

$$\tau_0^3 = 6HA^{-\frac{1}{2-n}} B^{-2}, \quad (21)$$

$$\delta_{\max}^{3I} = 6HBA^{-\frac{1}{2-n}}. \quad (22)$$

Знание максимального размера капель жидкости, следующего из условия работы распылительного реактора в режиме полного испарения, позволяет целенаправленно изменять параметры ротационных дисковых распылителей с целью достижения требуемого эффекта «сухого» распыления. Связь максимального диаметра с параметрами дисковых распылителей может быть установлена на основании формулы Фридмана, Глукерта, Маршалла [6]

$$\frac{\delta_{\max}}{R} = 1,2 \left(\frac{L}{RN g \rho_p S} \right)^{0,6} \left(\frac{\rho_p g}{L} \right)^{0,2} \left(\frac{g^2 \rho_p \sigma S}{L^2} \right)^{0,1}$$

где R, S, N - радиус, смоченный периметр и скорость вращения диска распылителя; L - массовый расход жидкости; σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Из формулы следует, что укрупнение диаметра капель с 1÷50 мкм. в распылительных сушилках до 25÷250 мкм. в распылительном реакторе может быть достигнуто даже путем уменьшения скорости вращения диска распылителя. При этом, чтобы спектр капель не оказался двумодальным, желательно использовать распылители с соударением факелов.

Литература

1. А.Н. Николаев, О.В. Козулина, Р.Р. Фатыхов, *Вестн. Казанского технологического ун-та*, 3, 155-160 (2011)
2. М.Р. Вахитов, Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев, *Вестн. Казанского технологического ун-та*, 8, 130-134 (2011)
3. А.А. Русанов, И.И. Урбах, А.П. Анастасиади А.П., *Очистка дымовых газов в промышленной энергетике*. Энергия, Москва, 1969. 466с.
4. *Новое в области сушки методами распыления. Проспект фирмы «Ниро-Атомайзер»*. Международная выставка «Химия -77», Москва, 1977. 22с.
5. Д.Г. Пажи, В.С. Галустов, *Основы техники распыливания жидкостей*. Химия, Москва, 1984. 256с.
6. М.В. Лыков, Б.И. Леончик, *Распылительные сушилки*. Машиностроение, Москва, 1966. 332с.
7. В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, *Подготовка промышленных газов к очистке*. Химия, Москва, 1975. 216с.
8. С.Х. Абдульманов, Н.А. Николаев, А.А. Овчинников, В.С. Моряков, *Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология*, 21, 10. 150-152 (1978)
9. *Справочник по пылезолоулавливанию*. Под ред. А.А. Русанова, Энергия, Москва, 1975. 296с.
10. Р. Бусройд, *Течение газа со взвешенными частицами*. Мир, Москва, 1975. 378с.
11. З.Р. Горбис, *Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков*. Энергия, Москва, 1970. 428с.
12. Селберг, Николлс, *Ракетная техника и космонавтика*, 3, 22-31 (1968).
13. С.Х. Абдульманов, Н.И. Савельев, А.А. Овчинников, Н.А. Николаев, *Деп.НИИТЭХим*, Черкассы, №423хп-Д82, 2-13 (1982)

© **Ан. А. Овчинников** – ст. лаборант каф. оборудования пищевых производств КНИТУ, opp-srv@rambler.ru; **Ю. Ф. Коротков** – канд. техн. наук, доц. той же кафедры; **А. Н. Николаев** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. оборудования пищевых производств КНИТУ.