

Охрана окружающей среды

УДК 669.015.7

Вольчин И.А., Ращепкин В.А.*Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев*

Математическое моделирование процессов коагуляции частиц летучей золы с каплями жидкости в трубах Вентури мокрых скрубберов ТЭС

Приведены результаты математического моделирования процесса захвата твердых частиц каплями в трубе Вентури с уточнением существующей методики инженерных расчетов мокрых скрубберов Вентури в системах очистки дымовых газов ТЭС. Для различных конструкций и параметров очищаемого запыленного газового потока рассчитаны трехмерные характеристики степени улавливания твердых частиц, что предоставляет инструмент анализа и оптимизации параметров мокрых скрубберов Вентури.

Ключевые слова: промышленная пылеочистка, скрубберы Вентури, математическое моделирование, полимодальное распределение твердых частиц, полидисперсный капельный поток.

Наведено результати математичного моделювання процесу захоплення твердих частинок краплями в трубі Вентурі з уточненням існуючої методики інженерних розрахунків мокрых скрубберів Вентурі в системах очищення димових газів ТЕС. Для різних конструкцій та параметрів запыленого газового потоку, який очищується, розраховані тривимірні характеристики ступеня уловлення твердих частинок, що надає інструмент аналізу та оптимізації конструктивних параметрів мокрых скрубберів Вентурі.

Ключові слова: промислове пилоочищення, скрубери Вентурі, математичне моделювання, полімодальний розподіл твердих частинок, полідисперсний крапельний потік.

Одним из эффективных способов очистки дымовых газов от твердых частиц есть их коагуляция с каплями жидкости, которая реализуется в устройствах мокрой очистки дымовых газов. Так, большинство энергоблоков украинских ТЭС мощностью 150 и 200 МВт, а также угольных теплоэлектроцентралей оснащены мокрыми скрубберами Вентури, которые обеспечивают очистку дымовых газов от летучей золы до 96 %. Введение более строгих норм выбро-

сов, в частности, по выбросам частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ [1] требуют большей степени очистки дымовых газов. Поэтому представляет интерес исследование возможностей повышения эффективности мокрых скрубберов, особенно в части улавливания мелких фракций летучей золы, поглощаемых каплями жидкости в трубах Вентури. С этой целью проводятся экспериментальные исследования и математическое моделирование скрубберов Вентури.

Математическому моделированию скрубберов Вентури посвящено значительное количество работ [2–8]. Существует множество математических и инженерных моделей улавливания частиц каплями в трубах Вентури. Большинство экспериментальных проверок таких моделей проводится на лабораторных установках относительно малых размеров с небольшим расходом очищаемого газа, а новейших исследований на уровне промышленных образцов немного. Недостаточно исследовано влияние фракционного состава частиц и полидисперсности капельного потока на эффективность очистки запыленного газового потока каплями.

На многих лабораторных относительно малопроизводительных по расходу газа установках удается достичь достаточно высоких результатов по очистке запыленных потоков за счет увеличения расхода распыляемой жидкости. Однако в условиях работы существующих скрубберов Вентури ТЭС серьезным требованием является недопущение достижения температуры точки росы дымовых газов, что ограничивает наращивание расхода воды на распыление. Кроме того, повышение расхода воды на орошение газа в трубах Вентури приводит к росту затрат энергоблоков на собственные нужды, а дополнительные объемы водоподготовки — к удорожанию процесса очистки.

В статье приведены результаты математического моделирования влияния различных факторов на степень улавливания частиц летучей золы, которые образуются при сжигании твердого топлива. Приведенная математическая модель учитывает пространственное изменение скорости частиц и капель, коэффициента осаждения частиц на каплях вдоль трубы Вентури, а также позволяет рассчитать степень улавливания частиц золы полидисперсным капельным потоком для различных входных распределений частиц по размерам.

Предполагается, что все частицы и капли движутся вдоль трубы Вентури параллельно друг другу и сталкиваются в силу разной степени увлечения капель и частиц газовым потоком переменной скорости, причем количество и размер капель за время пребывания в трубе Вентури не изменяется. В такой постановке степень улавливания частиц золы в трубе Вентури рассчитывается по известной формуле [3, 9, 10]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{3L}{2D_{d0}} \frac{q_0}{\rho_1} \eta_{\Sigma} \left| \frac{v_p - v_d}{v_p} \right| dx\right), \quad (1)$$

где L — длина трубы Вентури от среза форсунки до входа в каплеуловитель, м; q_0 — расход

воды на орошение запыленного потока газа, кг/м³; η_{Σ} — коэффициент осаждения частиц золы диаметром d_p на шарах диаметром D_{d0} ; D_{d0} — средний размер капель, которые генерируются орошающей форсункой, м; ρ_1 — плотность воды, кг/м³; v_p — скорость частиц золы диаметром d_p , м/с; v_d — скорость капли диаметром D_{d0} , м/с; x — координата вдоль оси трубы Вентури.

Из формулы (1) видно, что максимальная степень улавливания золы на каплях в трубе Вентури тем выше, чем большими есть значения величин q_0/D_{d0} , η_{Σ} и $|(v_p - v_d)/v_p|$.

Расчеты эффективности улавливания частиц летучей золы при проектировании скрубберов Вентури в теплоэнергетике СССР выполнялись в соответствии с утвержденной методикой [3], которая в части проектирования труб Вентури основывается на формуле (1). Недостатком расчетов скрубберов с трубами Вентури по данной методике является то, что в формуле (1) интеграл заменяется произведением усредненных, но в действительности переменных вдоль трубы Вентури величин: значений «скоростного комплекса» $|(v_p - v_d)/v_p|$; коэффициента осаждения η_{Σ} , который полагается равным единице, независимо от размера частиц золы; не учитывается реальное распределение капель по размерам, которые заменяются монофракцией со средним диаметром капель D_{d0} . Кроме того, в скоростном комплексе разница скоростей частиц и капель должна относиться не к скорости частиц золы v_p , а к скорости капель v_d , поскольку интеграл в (1) определяется временем пребывания $dt = dx/v_d(x)$ в трубе Вентури каплей как объектов, на которых осуществляется коагуляция, а не временем пролета частиц золы $dt = dx/v_p(x)$, и поэтому скоростной комплекс должен определяться в виде $|(v_p - v_d)/v_d|$, как отмечается в [9, 10]. В результате перечисленных выше упрощений и неточностей расчетная эффективность улавливания частиц золы в трубах Вентури оказывается завышенной приблизительно на 8–10 %, а причины низкой эффективности улавливания мелких частиц сложно проследить более детально.

Для проведения расчетов степени улавливания частиц методом численного интегрирования вначале были рассчитаны профили скоростей движения газа в трубе Вентури [11] для набора типовых конфигураций и рабочих параметров труб Вентури, которые применяются в промышленной газоочистке. Затем были рассчитаны профили скоростей и капель различного диаметра. На основе этих расчетов были получены трехмерные характеристики степени улавлива-

ния частиц каплями в трубах Вентури. Были проведены оценки влияния механизмов дробления и испарения капель в потоке горячих дымовых газов на функцию распределения капель по размерам.

В рассматриваемой модели скорость движения каплей относительно газа $v_r = v_d - v_g$ определяется вязкими силами сопротивления среды (газа), при этом движение капли диаметром D_d определяется следующим уравнением:

$$\rho_1 \frac{\pi D_d^3}{6} \frac{dv_{\vec{a}}}{dt} = \xi \frac{\pi D_d^2}{8} \rho_g v_{\vec{a}}^2, \quad (2)$$

где ρ_g — плотность дымовых газов, кг/м³; ξ — коэффициент аэродинамического сопротивления.

Для коэффициента ξ используются различные аппроксимирующие зависимости. В данной модели для коэффициента сопротивления движению капель и частиц была использована следующая формула [12]:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4 \\ Re &= \frac{D_d \rho_g v_{\vec{a}}}{\eta_g} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где Re — число Рейнольдса; η_g — динамическая вязкость дымовых газов, Па·с.

После подстановки (3) в (2) получается уравнение, которое не имеет аналитического решения и должно решаться численными методами.

Так же, как и для капель, рассчитываются профили скорости частиц золы вдоль трубы Вентури. При этом для частиц золы используются уравнения, аналогичные (2) и (3), но с поправкой Каннингема C_c к коэффициенту аэродинамического сопротивления $\xi' = \xi/C_c$ на проскальзывание мельчайших частиц, размер которых приближается к длине свободного пробега молекул газа. Поправка Каннингема рассчитывается по уравнению Кнудсена — Вебера [9, 10, 13]:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_g}{d_p} \{1,257 + 0,4 \exp[-1,10 \frac{d_p}{2\lambda_g}]\},$$

где λ_g — длина свободного пробега молекул газа при заданной температуре, м.

Коэффициент осаждения η_{Σ} частиц на шаре (капле) является вероятностной характеристикой и для условий коагуляции частиц золы на каплях в трубе Вентури имеет как минимум три составляющие, которые учитывают броуновскую диффузию частиц к каплям, эффект

зацепления частиц за капли и собственно инерционное осаждение частиц на каплях:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_d + \eta_t + \eta_i \leq 1.$$

Имеется обширный объем теоретических и экспериментальных исследований по коэффициенту осаждения частиц на сферах η_{Σ} [2, 7–10]. Для коэффициента осаждения по механизму броуновской диффузии при данном моделировании была использована аппроксимирующая зависимость [10]:

$$\eta_d = \frac{8}{Re Sc} [1 + \frac{0,4}{\sqrt{2}} Re^{1/2} Sc^{1/3} + \frac{0,16}{\sqrt{2}} Re^{1/2} Sc^{1/2}],$$

где Sc — число Шмидта для частиц, $Sc = \eta_g / (\rho_g D_B)$ (здесь D_B — коэффициент броуновской диффузии с поправкой Каннингема C_c , $D_B = k T_g C_c / (3 \pi \eta_d d_p)$; k — постоянная Больцмана, Дж/(кг·К); T_g — температура газа, К).

Значения коэффициента осаждения золы на каплях η_t за счет эффекта зацепления при потенциальном обтекании (больших числах Рейнольдса) лежит в пределах от $2R_d$ до $3R_d$, где $R_d = d_p/D_d$ [9]. Существуют определенные сложности аддитивного представления коэффициента осаждения частиц на сферах [10], поэтому часто эффект зацепления в расчетах не используют [2], а пользуются только аппроксимацией для коэффициента инерционного осаждения η_i .

При проведении расчетов для коэффициента осаждения по инерционному механизму была принята следующая аппроксимация [6, 8]:

$$\eta_i = \left(\frac{St}{St + 0,7} \right)^2,$$

в которой коэффициент инерционного осаждения частиц на каплях η_i является функцией критерия Стокса:

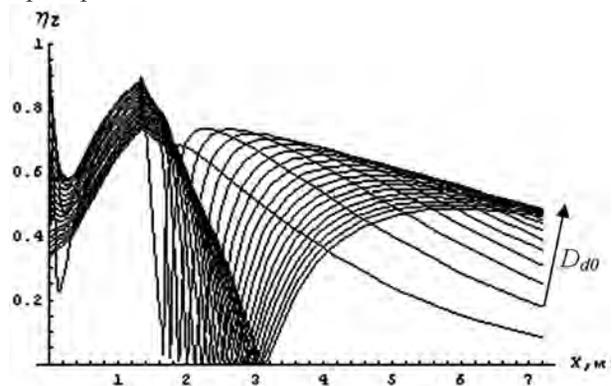


Рис. 1. Изменение коэффициента осаждения η_{Σ} частиц на каплях вдоль трубы Вентури.

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 (v_p - v_d) C_c}{18 \eta_g D_d},$$

где ρ_p – плотность материала частиц, кг/м³.

Результаты расчетов распределения значений суммарного коэффициента осаждения η_Σ , например, для частиц диаметром $d_p = 3$ мкм на каплях с диаметрами $D_{d0} = 25, 50-500$ мкм вдоль трубы Вентури приведены на рис.1. Видно, что полагать коэффициент осаждения постоянным и равным единице вдоль трубы Вентури (как принимается в методике расчета скрубберов Вентури в [3]), по крайней мере для частиц диаметром менее 10 мкм не является корректным.

Результаты расчетов по математической модели улавливания частиц каплями в трубах Вентури

По данным расчетов относительных скоростей движения частиц и капель, а также коэффициента осаждения η_Σ по формуле (1) с принятыми уточнениями была рассчитана трехмерная функция $\eta(d_p, D_d)$ степени улавливания частиц золы каплями в трубе Вентури, приведенная на рис.2. В расчетах принималось, что расход воды на орошение запыленного газового потока составляет $q_0 = 160$ г/м³, что при входной температуре газа 150 °С обеспечивает недопущение температурой газового потока точки росы. В расчетных уравнениях не учитывались процессы испарения и дробления капель.

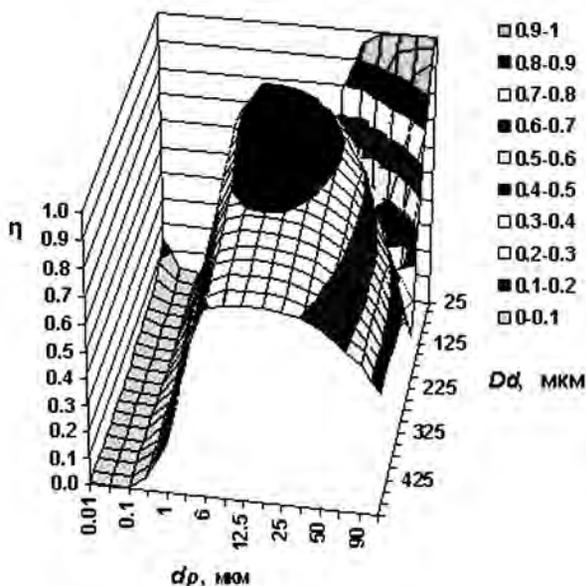


Рис.2. Трехмерная функция $\eta(d_p, D_d)$ степени улавливания частиц золы каплями в трубе Вентури.

Как видно из рис.2, функция степени улавливания частиц каплями имеет характерный гребень наилучшего поглощения с максимумом в области диаметра частиц $d_p = 10$ мкм и капель с диаметрами, близкими к $D_{d0} = 125$ мкм. За гребнем наблюдается провал поглощения относительно крупных частиц каплями, существование которого объясняется тем, что в этой области размеров величины аэродинамических диаметров частиц и капель близки, частицы и капли движутся с близкими скоростями, при этом слабо взаимодействуя между собой. Такой ход характеристики, в частности, подтверждает наблюдаемое на практике падение степени улавливания крупных частиц золы в трубах Вентури [2]. Другой провал функции улавливания в области размеров частиц около 0,1 мкм связан с низкими значениями критерия Стокса для малых частиц, которые эффективно огибают более крупные капли по линиям тока газа. Подъем характеристики улавливания до значений $\eta = 1$ при малых размерах капель связан с резким возрастанием вероятности столкновения с крупными частицами относительно мелких капель, которых при фиксированном объеме распыляемой жидкости в потоке газа достаточно много. Однако в этом случае скорее следует говорить о смачивании частиц жидкостью, а не об их улавливании каплями. Незначительный подъем функции η в области размеров $d_p = 0,01-0,025$ мкм и $D_{d0} = 25-40$ мкм поясняется действием механизма броуновской диффузии. По этому механизму эффективно улавливаются наномикронные частицы, обычно представленные комплексами, складывающимися из десятков атомов тяжелых металлов, которые образуются в результате конденсации за котлами паров металлов, содержащихся в сжигаемом топливе.

Аналогичную форму характеристики улавливания частиц каплями имеют все трубы Вентури. Причем в зависимости от конструктивных параметров (размера конфузора, диффузора, диаметра горловины) и рабочих параметров газового потока (скорость, температура газа) форма характеристики улавливания частиц изменяется: изменяются максимальное значение η , ширина и угол наклона гребня наилучшего поглощения частиц каплями.

На рис.3 представлены изолинейные проекции характеристики $\eta(d_p, D_d)$ для трех конструкций трубы Вентури с разными размерами и скоростями газа в горловине v_g . Видно, что проекция области наилучшего поглощения частиц каплями ($\eta = 0,8-0,9$) на плоскость (d_p, D_d) имеет разные величины ширины и протя-

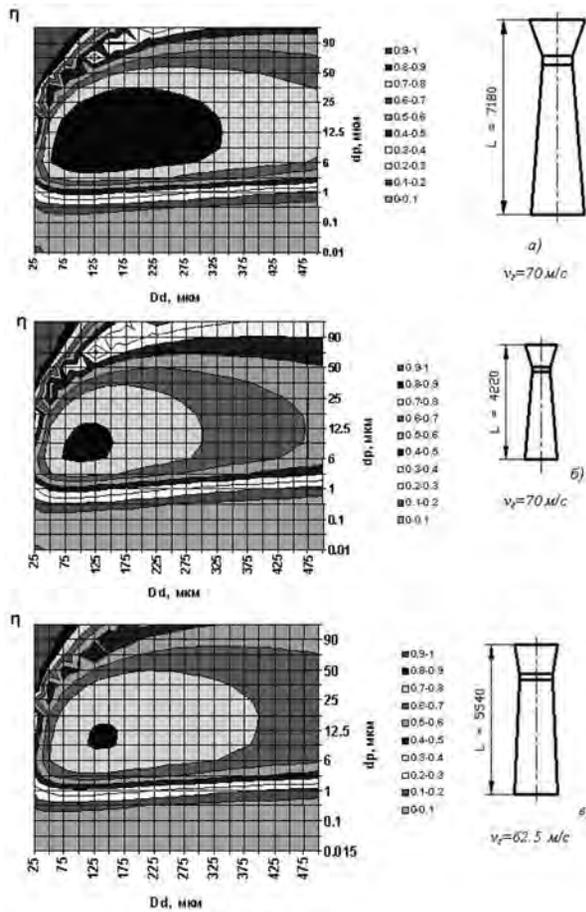


Рис.3. Изолинейные проекции характеристик степени улавливания частиц каплями для трех конфигураций трубы Вентури.

женности для различных конструкций и скоростей газа в горловине трубы Вентури. Поэтому, подбирая конструктивные и рабочие характеристики, можно для заданного распределения частиц по размерам получить различные акценты в процессе очистки запыленного потока газа в сторону удаления из потока более крупных или более мелких частиц зола. Конечный результат будет в значительной мере зависеть от характеристик распыления жидкости и от начального распределения частиц по размерам.

К сожалению, значительную проблему в улавливании частиц зола представляет провал в характеристике $\eta(d_p, D_d)$ в области диаметров d_p около 0,1 мкм. Несмотря на то, что изменением параметров распыления орошающей жидкости и конструктивных параметров труб Вентури можно достичь увеличения степени улавливания частиц каплями в разных диапазонах размеров частиц, провал характеристики степени улавливания в данной области размеров частиц сохраняется для всех конструкций, независимо от параметров и размеров труб Вентури.

Ясно, что если на область этого провала характеристики приходится более одного процента массы во входном распределении частиц зола, то достижение 99 %-й степени очистки газа от частиц скрубберами Вентури не представляется возможным, поскольку характеристики каплеуловителей, установленных за трубой Вентури, тем более не позволяют уловить частицы таких размеров.

Зависимость степени улавливания частиц в трубе Вентури от размера капель

Влияние размера капель на эффективность улавливания частиц можно продемонстрировать следующим примером. Допустим, что входное массовое распределение частиц зола по размерам $F_1(d_p)$ представлено в виде суперпозиции нескольких распределений с плотностями f_1, f_2, \dots, f_n так, что

$$F_1(d_p) = f_1 + f_2 + \dots + f_n.$$

Такое распределение показано на рис.4 (кривая 1). Это типичное полимодальное распределение, характерное для частиц летучей зола за котлами ТЭС, сжигающими угли [2]. Используя рассчитанную характеристику степени улавливания для капель фиксированного диаметра D_{d0} , можно получить выходное массовое ненормированное распределение частиц по размерам за трубой Вентури в виде

$$F_2(d_p) = [1 - \eta(d_p, D_{d0})] F_1(d_p). \quad (4)$$

Тогда степень очистки газового потока от пыли в трубе Вентури монофракцией капель диаметром D_{d0} определяется по формуле

$$\eta(D_{d0}) = \frac{\int_0^{\infty} [1 - \eta(d_p, D_{d0})] F_1(d_p) (dd_p)}{\int_0^{\infty} F_1(d_p) (dd_p)}. \quad (5)$$

Рассмотрим результат моделирования очистки запыленного газового потока двумя монодисперсными аэрозолями с разным диаметром капель. Пусть в первом случае форсунки на входе трубы Вентури распыляют заданный объем жидкости q_0 полностью в капли диаметром $D_{d0} = 125$ мкм. Как показано на рис.4, после применения формулы (4) входное распределение $F_1(d_p)$ частиц зола по размерам (кривая 1) после очистки газового потока в трубе Вентури каплями трансформируется в выходное распределение $F''_2(d_p)$, представленное кривой 2. До-

пустим, что во втором случае для той же трубы Вентури тот же объем жидкости q_0 распыляется в более крупные капли диаметром $D_{d0} = 200$ мкм. Тогда, используя соответствующее сечение характеристики $\eta(d_p, D_{d0})$ в формуле (4), получим выходное распределение частиц по размерам $F'_2(d_p)$, представленное кривой 3.

Из сравнения кривых 2 и 3 видно, что при распылении орошающей жидкости в более мелкую фракцию капель доля мелких частиц в выходном распределении становится заметно меньшей, чем при орошении запыленного потока в трубе Вентури более крупными каплями, однако применение более тонкого распыла приводит к определенному снижению улавливания в трубе Вентури более крупных частиц. Причем поскольку на крупные частицы может приходиться большая масса, то и результирующая степень очистки газа в трубе Вентури по массе может снижаться. Это позволяет сделать вывод о том, что более тонкий распыл орошающей жидкости способствует достижению более высокой степени очистки запыленного газа от частиц класса PM_{10} , однако в меньшей степени способствует захвату средних по размеру частиц. Такой качественный эффект может позитивно сказаться на степени улавливания, если на долю мелких частиц приходится большая масса во входном распределении частиц золы по размерам, как, например, в случае сжигания тощих углей. Поэтому при выборе способа распыла жидкости входное распределение частиц золы по размерам имеет большое значение, и этот факт следует учитывать при проектировании скрубберов Вентури.

Если в уравнении (1) придавать D_{d0} различные значения и определять в соответствующем сечении максимум функции трехмерной характеристики $\eta(d_p, D_{d0})$, можно указать диа-

метры частиц, которые улавливаются с максимальной эффективностью каплями заданного размера. При заданных конструкции и рабочих параметрах трубы Вентури капля каждого определенного размера наилучшим образом улавливает частицы золы определенного размера, причем общая тенденция такова, что мелкие частицы лучше улавливаются относительно мелкими каплями, а крупные — более крупными каплями. При этом соотношения аэродинамических диаметров частиц и капель должны обеспечивать эффективное действие инерционного механизма захвата, что достигается максимизацией критерия Стокса, в частности, и подынтегрального выражения в (1) вообще.

Существование глобального максимума характеристики $\eta(d_p, D_{d0})$ с определенным значением D_{d0} не означает, что распыление жидкости в капли именно такого диаметра обеспечит максимальную степень очистки газа от твердых частиц, поскольку нормативы выбросов определяют массу выбросов частиц, и поэтому конечный результат сильно зависит от входного распределения частиц золы по массе: чем больше в потоке массивных частиц, тем большими должны быть капли для достижения максимального эффекта очистки по массе. Однако, назначением трубы Вентури в скрубберах ТЭС является улавливание именно мелких частиц золы, а более крупные частицы должны улавливаться вместе с каплями в каплеуловителе, установленном за трубой Вентури. Поэтому вполне логично стремиться к смещению акцента в сторону максимального улавливания трубой Вентури мелких частиц, подбирая размеры капель (параметры форсунок), которые обеспечивают улавливание таких частиц.

Влияние полидисперсности капельного потока на степень улавливания частиц золы в трубах Вентури

Характеристики $\eta(d_p, D_{d0})$ степени улавливания частиц золы каплями в трубах Вентури (см. рис.3) были получены в предположении, что расход жидкости, распыляемой в монофракцию капель любого размера, составляет $q_0 = 160$ г/м³, что обеспечивает выполнение условия недостижения температурой парогазового потока точки росы. Для расчета степени улавливания частиц каплями полидисперсного капельного потока необходимо учесть, что на каждую фракцию капель приходится определенное количество жидкости, которое с помощью функции распределения капель по размерам может

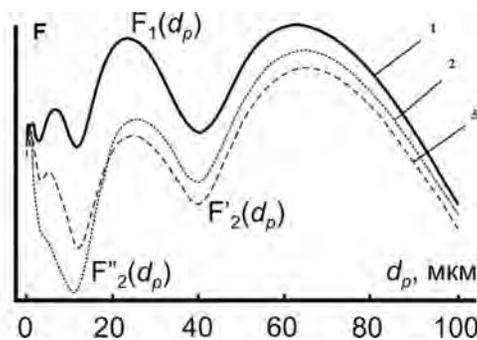


Рис.4. Входное массовое полимодальное распределение частиц по размерам $F_1(d_p)$ (1) и трансформация функции распределения частиц по размерам при прохождении запыленного потока через трубу Вентури: 2 — выходное распределение при орошении запыленного потока каплями диаметром $D_{d0} = 125$ мкм ; 3 — то же для $D_{d0} = 200$ мкм.

быть представлено следующей функцией диаметра капли D_d :

$$q(D_d) = \frac{\rho_l \pi}{6} \int_0^{\infty} \delta(D_d - D) f(D) D^3 dD. \quad (6)$$

где δ — дельта-функция Дирака.

Величина D_d приобретает значения, которые определяются параметрами форсунки с соответствующей функцией распределения капель по размерам $f(D)$, $1/m$. Поэтому в общем случае уравнение (1) для расчета степени улавливания частиц каплями должно быть записано в следующем виде:

$$\eta(D_d, d_p) = 1 - \exp\left[-\frac{3}{2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{q(D_d)}{D_d \rho_l} \eta_{\Sigma} \times \left| \frac{v_p - v_d}{v_p} \right| (dx)(dd_p)(dD_d)\right], \quad (7)$$

где $q(D_d)$ определяется по формуле (6).

Легко показать, что для любого $q_1(D_d) = \text{const}$ имеет место следующее соотношение

$$(1 - \eta_1) = (1 - \eta_0) q_1 / q_0,$$

и поэтому полученная для фиксированного значения q_0 характеристика $\eta_0(d_p, D_d)$ по данной формуле может быть пересчитана для любого распределения $f(D_d)$ капель по размерам. Применяя полученную характеристику к функции входного распределения частиц золы по размерам, можно получить функцию выходного массового распределения частиц за трубой Вентури, а проинтегрировав полученную функцию по диаметрам частиц, — результирующую степень очистки дымовых газов от частиц золы каплями по принципу, устанавливаемому формулами (5), (7).

В статье [14] отмечается, что при больших скоростях газа в горловине и невысоких расходах орошающей жидкости полидисперсность капельного потока почти не влияет на степень улавливания частиц каплями в трубе Вентури. Такой вывод подтверждается полученными в данной статье результатами моделирования. Действительно, из рис.3 (а) видно, что гребень трехмерной характеристики степени улавливания для $q_0 = 160 \text{ г/м}^3$ и скорости газа в горловине $v_{\Gamma} = 70 \text{ м/с}$ является достаточно протяженным и относительно плоским, поэтому эффективность улавливания частиц каплями размером $D_{d0} = 75\text{--}325 \text{ мкм}$ почти одинакова и влияние на результат очистки полидисперсности капельного потока проявляется слабо. Из

рис.3 (б, в) также можно сделать вывод, что при меньшей скорости газа в горловине и меньшей длине труб Вентури гребень характеристики улавливания сужается и становится менее протяженным, поэтому для большей эффективности улавливания требуется сужение разброса размеров капель и приближение их среднего размера к определенному значению, поскольку в противном случае определенная часть капель полидисперсного потока будет работать не в максимуме, а на спаде характеристики. Следовательно, в определенных условиях полидисперсность капельного потока с точки зрения эффективности улавливания частиц может приобретать не меньшую значимость, чем входное распределение частиц запыленного потока по размерам.

Влияние процессов испарения, дробления и слияния капель

Помимо основного процесса коагуляции частиц золы на каплях и соответствующего увеличения размера капель в результате накопления в них твердых частиц, в трубе Вентури капли также дробятся, испаряются, сливаются, оседают на стенках. Все эти процессы приводят к непрерывному изменению функций распределения капель и частиц по размерам. Задачу эволюции функций распределения на практике решить достаточно сложно. Однако можно оценить влияние перечисленных процессов на результаты моделирования коагуляции частиц с каплями в рабочих условиях труб Вентури.

Оценим сначала влияние процессов испарения капель и накопления частиц на каплях на размер капель. Диаметры капель, генерируемых форсунками, распределены по определенному закону. Наиболее точно экспериментальные данные по распылу жидкостей описываются распределением Нукиямы — Танасавы [10, 15], однако с точки зрения устойчивости к отклонению параметров распределения более удобно использовать логарифмически-нормальное распределение, хотя некоторыми авторами используются и другие распределения капель по размерам [16]. Расчеты [17] показывают, что начальное распределение капель по размерам при их испарении в потоке горячих дымовых газов претерпевает значительное изменение формы из-за того, что мелкие капли испаряются быстрее крупных.

Вместе с процессом испарения на одной капле диаметром D_{d0} за время ее пролета через трубу Вентури оседает количество частиц, которое определяется по формуле [9]:

$$n_p = \sum_{i=0}^L \int \frac{N_{pi} |v_{pi} - v_d| \pi D_{d0}^2}{4} \eta_{\Sigma} \frac{dx}{v_d},$$

где N_{pi} — счетная концентрация твердых частиц i -й фракции:

$$N_{pi} = m_p S_i / (\rho_p \pi d_{pi}^3 / 6),$$

где m_p — массовая концентрация твердых частиц, кг/м³; S_i — доля i -й фракции твердых частиц; d_{pi} — диаметр твердой частицы i -й фракции, м.

Из приведенной формулы для заданного распределения частиц по размерам можно определить изменение диаметра капли после осаждения на ней частиц за время прохождения трубы Вентури.

Были проанализированы результаты накопления частиц золы на каплях разного диаметра при заданных скорости газа и типичном распределении частиц золы по размерам [2], а также относительное изменение диаметра капель разного диаметра вследствие их испарения в потоке горячих дымовых газов за время прохождения трубы Вентури. Капли диаметром < 50 мкм за время пролета трубы Вентури заметно теряют в размере (до 40 %) вследствие их испарения, поэтому диаметр таких капель нельзя считать постоянным при прохождении трубы Вентури. Потеря в размере вследствие испарения капель крупнее 100 мкм на единицы процента приблизительно компенсируется увеличением на единицы процента их размеров вследствие осаждения на них частиц за время прохождения трубы Вентури. Данные обстоятельства необходимо принимать во внимание при определении крупности распыла капель: для более эффективного улавливания мелких частиц золы следует использовать более мелкие капли, однако учитывая также и то, что мелкие капли быстрее испаряются. Очевидно, что существует оптимальный размер капель, приходящийся на диапазон $D_{d0} = 75 - 150$ мкм.

Была проведена оценка влияния процессов дробления капель при прохождении трубы Вентури. Однозначно определить распределение капель по размерам в разных сечениях трубы Вентури достаточно сложно. В [16] приведены результаты измерения оптическими методами размеров капель вдоль трубы Вентури с масштабами и параметрами потока, приближающимися к промышленным образцам. Авторами этой работы по результатам измерений были восстановлены распределения капель по разме-

рам в разных сечениях труб Вентури. В результате дробления капель в горловине типичного скруббера с трубой Вентури длиной более 1 м средний диаметр капель лежит в диапазоне 50–100 мкм.

Дробление капель в скоростном потоке газа происходит вследствие развития неустойчивости границы капли. Возможность распада капли жидкости с коэффициентом поверхностного натяжения σ (кг/с²) определяется по критическому числу Вебера:

$$We = D_d \rho_g (v_d - v_g)^2 / \sigma.$$

На основании приведенных результатов математического моделирования скорости газа и капель были рассчитаны профили распределения критических чисел Вебера вдоль трубы Вентури для капель с диаметрами $D_d = 50, 100 - 500$ мкм. Разными авторами приводятся различные значения критических чисел Вебера, при которых происходит дробление капель. Обычно считается, что распад капель происходит в диапазоне $We = 5 - 30$ [4, 9, 12]. В соответствии с расчетами, проведенными для трубы Вентури с $L = 7,2$ м и скоростью газа в горловине 70 м/с, распад начинается с капель диаметром более 300 мкм, для которых $We = 5$. Такой результат хорошо согласуется с результатами другой расчетной модели [4], в которой также подтверждается отсутствие за горловиной капель диаметром более 300 мкм, что вместе с результатами [16] обосновывает интегрирование уравнений (1), (7) по всей длине трубы Вентури от 0 до L по каждой фракции капель отдельно. В иных условиях в расчет следует принимать процесс дробления капель.

Изменение размеров капель вследствие их слияния становится заметным при больших расходах орошающей жидкости q_0 (не менее 1 л/м³ газа) [4]. Однако при больших расходах жидкости на орошение труб Вентури значение температуры парогазового потока вследствие испарения капель может снизиться ниже точки росы. В большинстве скрубберов Вентури ТЭС $q_0 = 0,1 - 0,2$ г/м³, и процесс слияния капель можно не учитывать.

Из приведенного выше следует, что процессы дробления и слияния капель для рабочих параметров труб Вентури практически мало сказываются на функции распределения капель по размерам и не требуют разбиения интервала интегрирования в предложенной математической модели, если начальное распределение капель по размерам принудительно задается параметрами распыла орошающей жидкости форсунками так, что размер капель не превышает

300 мкм при скоростях газа в горловине трубы Вентури 70 м/с.

Выводы

Построена уточненная математическая модель, которая позволяет исследовать закономерности коагуляции частиц золы на каплях в трубах Вентури промышленных масштабов на основе рассчитанных трехмерных характеристик степени улавливания частиц каплями в трубах Вентури с разными конструктивными и рабочими параметрами.

В данной модели учтено распределение вдоль трубы Вентури коэффициента осаждения частиц на каплях. Расчеты подтверждают, что учет в существующей методике расчета скрубберов Вентури изменчивости коэффициента осаждения приводит к завышению степени улавливания частиц на каплях, а также не позволяет в полной мере исследовать проблему улавливания мелких частиц в мокрых скрубберах.

Особое значение для определения эффективности улавливания твердых частиц каплями в трубах Вентури имеет входное распределение частиц по размерам, которое диктует оптимальные геометрические и физические параметры труб Вентури, а также оптимальный размер капель орошающей жидкости. Показано, что создание заданного распределения капель по размерам через форсунки распыла жидкости можно достичь повышения степени улавливания частиц золы в определенном диапазоне их размеров.

На основе полученных характеристик для заданного входного распределения летучей золы можно рассчитать распределение частиц золы за трубой Вентури для использования в моделировании процессов их дальнейшего удаления из газового потока в каплеуловителе и (или) с помощью дополнительного оборудования доочистки (мокрых электростатических фильтров (ЭСФ), тканевых фильтров).

Полученные характеристики позволяют проанализировать влияние полидисперсности капельного потока орошающей жидкости на степень улавливания частиц. Показано, что характеристики улавливания частиц при большей протяженности труб Вентури с большей скоростью газа в горловине имеют широкую область максимума очистки газового потока от частиц в широком диапазоне размера капель, поэтому полидисперсность капельного потока в таких трубах слабо влияет на результат очистки газа. Напротив, для коротких труб Вентури полидисперсность капельного потока может иметь большое влияние на результат очистки запыленного

газового потока, что требует более тщательного подбора параметров распыла жидкости.

Результаты моделирования подтверждают, что мокрые золоуловители с трубами Вентури не позволяют обеспечить выполнение европейских требований по улавливанию твердых частиц запыленных потоков промышленных газов, поэтому необходимо искать пути повышения степени их улавливания за счет реконструкции газоочистного оборудования с применением, например, мокрых ЭСФ и (или) тканевых фильтров, устанавливаемых дополнительно за мокрыми золоуловителями.

Список литературы

1. Директива 2008/50/ЕС Европейского парламента и Совета «О качестве атмосферного воздуха и мерах его очистки». — Страсбург, 21 мая 2008 года.
2. Кропп А.И., Акбрут Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. — М.: Энергия, 1977. — 460 с.
3. Указания по расчету и проектированию золоуловителя с трубой Вентури типа МВ при модернизации газоочистного оборудования тепловых электростанций / Уралтехэнерго, Всесоюз. теплотехн. ин-т им. Ф.Э. Дзержинского; Сост.: А.И. Акбрут, Л.И. Кропп, И.Я. Винник и др. — М., 1979.
4. Палатник И.Б. Пылеуловители с трубами-коагуляторами Вентури. — Алма-Ата: Наука, 1981. — 208 с.
5. Costa M.A., Ribeiro A.P., Tognetti E.R. et al. Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Fine Powder from a Confined Gas Stream // Materials Research. — 2005. — Vol. 8, № 2. — P. 177–179.
6. Cooper D.W., Leith D. Venturi Scrubber Optimization Revisited // Aerosol Sci. Technol. — 1984. — № 3. — P. 63–70.
7. Ravi G., Gupta S.K., Viswanathan S., Ray M.B. Optimization of Venturi Scrubbers Using Genetic Algorithm // Ind. Eng. Chem. Res. — 2002. — Vol. 41. — P. 2988–3002.
8. Rudnick S.N., Koehler M.J.L., Martin K.P. et al. Particle Collection Efficiency in a Venturi Scrubber: Comparison of Experiments with Theory // Environ. Sci. Technol. — 1986. — Vol. 20, № 3. — P. 237–242.
9. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. — М.: Металлургия, 1988. — 256 с.
10. Flagan R.C., Seinfeld J.H. Fundamentals Of Air Pollution Engineering // California Institute of Technology, PRENTICE HALL. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1988.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
12. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — Т. 1. — 464 с.

13. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. — М. : Химия, 1972. — 248 с.
14. Lim Daw Shyan, Viswanathan S. Effect of Polydispersity of Droplets in the Prediction of Flux Distribution in a Venturi Scrubber // Environ. Sci. Technol. — 2000. — Vol. 34. — P. 5007–5016.
15. Babinsky E., Sojka P.E. Modelling drop size distributions // Progress in Energy and Combustion Science. — Pergamon Press. 28. 2002. — P. 303–329.
16. Azzopardi B.J., Silva A.M., Leao C.P. et al. Axial variation of droplet distribution in a venturi scrubber // WIT Transactions on Ecology and the Environment. — 2008. — Vol. 114. — P. 179–187.
17. Вольчин И.А., Карацуба А.С., Рашепкин В.А. Эволюция функции распределения капель по размерам при орошении запыленного потока горячих отходящих газов водным аэрозолем // Новини енергетики. — 2009. — № 12. — С. 17–23.

Поступила в редакцию 07.03.12

Volchyn I.A., Raschepkin V.A.

Coal Energy Technologies Institute of NASU, Kiev

Mathematical Simulation of the Processes of Fly Ash Particles Coagulation with Droplets in Venturi Tubes of Heat Electric Stations Wet Scrubbers

The results of mathematical simulation of solid particles coagulation by blobs in Venturi Tubes with the existing method of Venturi wet scrubbers engineering calculation in waste gases heat electric stations. For different designs and parameters of the dusted gas flows, three-dimensional characteristics are obtained that provide the instrument for analysis and optimization of design parameters of the wet Venturi scrubbers.

Key words: industrial dedusting, Venturi scrubbers, mathematical modeling, polymodal solid particles distribution, polydisperse droplets flow.

Received March 7, 2012

з 10 квітня!

Передплатіть наше видання на II півріччя 2012 року!

У кожному поштовому відділенні України!

А також на сайті **www.presa.ua**

Каталог України 2012 II півріччя

Каталог України 2012 Подвійний

С 10 апреля началась подписка на украинские и зарубежные периодические издания на II полугодие 2012 года.

Оформить подписку можно по **«Каталогу изданий Украины»** и по **«Каталогам изданий зарубежных стран»** в любом почтовом отделении Украины, а также воспользовавшись услугой **«Подписка ON-LINE»** на корпоративном сайте предприятия **www.presa.ua**. Рассчитаться за издание можно платежными карточками Visa и MasterCard, через систему Webmoney или оплатив в банке формулирующий на сайте счет.