

Вольчин И.А., докт. техн. наук, **Ращепкин В.А.,** канд. техн. наук
Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Особенности очистки дымовых газов в мокрых скрубберах с трубой Вентури в условиях избыточного орошения

Радикальное увеличение плотности орошения потока дымовых газов в мокрых скрубберах Вентури позволяет существенно повысить эффективность таких золоуловителей до уровня соблюдения европейских требований по выбросам пыли. Такое изменение режима работы заметно влияет на характер процессов теплопереноса и имеет особенности, которые важно учитывать при реконструкции и проектировании установок мокрой пылеочистки газов. Приведены результаты математического моделирования процесса очистки дымовых газов от частиц летучей золы в мокрых скрубберах Вентури в условиях избыточного орошения. Исследована динамика основных теплофизических параметров гетерогенного потока в среде с изменяющимся влагосодержанием. Рассмотрено влияние диаметра капель на эффективность мокрых скрубберов. Исследовано изменение гидродинамического сопротивления мокрого золоуловителя при разных плотностях орошения газового потока. Оценено влияние входного распределения частиц летучей золы по размерам на результат пылеочистки. *Библ. 26, рис. 5, табл. 1.*

Ключевые слова: пылеочистка, летучая зола, мокрый скруббер Вентури, плотность орошения, гидродинамическое сопротивление.

Доля мокрых скрубберов с трубами Вентури (МСВ) как аппаратов пылеочистки дымовых газов на угольных теплоэлектростанциях Украины (ТЭС) составляет около 40 %. В Украине в ноябре 2017 г. распоряжением Кабинета Министров одобрен Национальный план сокращения выбросов от крупных сжигающих установок (НПСВ) [1], согласно которому выходная концентрация частиц золы на угольных энергоблоках должна после 2028 г. отвечать требованиям европейских Директив: не выше 50 мг/нм³ по Директиве 2001/80/ЕС [2] до ввода в эксплуатацию установки десульфуризации, а Директива 2010/75/EU о промышленных выбросах требует соблюдения порогового значения выброса пыли существующих котлов не более 20 мг/нм³ [3].

Для обеспечения таких требований эффективность системы пылеочистки должна составлять не менее 99,85 % при исходной запыленности потока дымовых газов (ДГ) 30 г/нм³. Оптимизация конструктивных параметров мокрых скрубберов имеет ограниченные возможности для дальнейшего существенного увеличения их эффективности. Значительное улучшение пылеулавливания в мокрых скрубберах может быть достигнуто в основном только за счет увеличения расхода воды на орошение труб (коагуляторов) Вентури.

Ранее плотность орошения газового потока в трубе Вентури ограничивалась на уровне 150–200 мл/нм³, что является условием не достижения дымовыми газами водяной точки росы и потенциальной опасности коррозии оборудования, расположенного вниз по потоку. Выполнение НПСВ, помимо пылеочистки, предусматривает внедрение на сжигающих установках систем сероочистки, наиболее эффективными из которых являются установки мокрого типа [4]. В таком случае ограничение на уровень орошения труб Вентури может быть ослаблено. Ранее уже предлагалось применение повышенных уровней орошения труб Вентури как способа увеличения эффективности улавливания пыли [5], причем для поддержания температуры уходящих газов выше точки росы одновременно с повышением плотности орошения рекомендовалось увеличивать диаметр капель.

Существует и практический опыт использования режимов интенсивного орошения скрубберов с трубами Вентури [6]: в 2007 г. на котле № 12 Тольяттинской ТЭЦ была выполнена модернизация по переводу мокрых золоуловителей на режим интенсивного орошения, что позволило повысить эффективность золоулавливания до 99,2–99,5 % за счет увеличения плотности орошения коагуляторов Вентури в 3–3,5 раза. Однако при этом потребовался также по-

догрев очищенных дымовых газов не менее чем на 10 °С. Факт роста эффективности мокрых скрубберов за счет увеличения расхода орошающей жидкости на трубу Вентури очевиден и подтверждается множеством лабораторных экспериментов [7–9], а также результатами экспериментов на сжигающих установках промышленного масштаба [6, 7]. Теоретические и инженерные расчеты эффективности мокрых скрубберов при стандартных уровнях орошения трубы Вентури проводились многими авторами [10–14].

Увеличение расхода орошающей жидкости оказывает влияние на эффективность и выбор рабочих параметров мокрого золоуловителя. Возрастание расхода орошающей жидкости влияет на динамику испарения капель в среде с

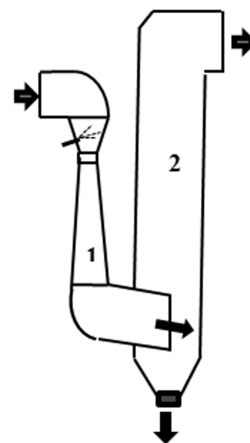


Рис. 1. Схема мокрого скруббера с коагулятором Вентури.

№№ п/п	Входные параметры	Значения
1	Расход дымовых газов, нм ³ /час	100 000
2	Запыленность газового потока, г/нм ³	30
3	Температура дымовых газов, °С	150
4	Влажесодержание дымовых газов на входе, об. % (уголь марки Г)	8
5	Влажесодержание дымовых газов, г/кг сухого воздуха	46
6	Температура орошающей воды (капель), °С	20
7	Длина трубы Вентури, мм	7 200
8	Диаметр каплеуловителя, мм	4 000
9	Высота каплеуловителя, мм	10 600
10	Скорость дымовых газов в горловине трубы Вентури, м/с	70
11	Время пребывания ДГ в трубе Вентури, мс	200
12	Время пребывания ДГ в каплеуловителе, с	4,4
13	Диапазон размеров капель, мкм	25–250
14	Плотность орошения ДГ, л/нм ³	0,05–1

Примечание. Тип угля — антрацит, газовые угли.

изменяющимся влажесодержанием, что определяет условия достижения температурой газа точки росы. От диаметра капель зависит эффективность захвата частиц летучей золы каплями в трубе Вентури. Увеличение плотности орошения приводит к росту гидродинамического сопротивления мокрого золоуловителя, что влечет за собой необходимость повышения производительности дымососа; заметное влияние на результат пылеочистки оказывает входное распределение частиц летучей золы по размерам. Изучение этих вопросов требует проведения дополнительных исследований, поэтому было проведено математическое моделирование, призванное определить степень влияния перечисленных факторов.

Схема мокрого скруббера Вентури представлена на рис.1. Запыленные дымовые газы

орошаются каплями перед горловиной трубы Вентури 1. В результате захвата частиц пыли каплями в газовом потоке переменной скорости происходит очистка газа от пыли, которая за трубой Вентури удаляется из газового потока в форме водяной пульпы, стекающей по стенкам центробежного каплеуловителя 2. И использованные для проведения расчетов входные данные приведены в таблице.

Для расчета эффективности улавливания пыли каплями в трубе Вентури использована широко применяемая математическая модель, подробно изложенная в статье [11]. Адекватность этой модели подтверждается множеством экспериментальных данных [6–10]. Согласно этой модели, эффективность улавливания пыли каплями в трубе Вентури определяется по формуле

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{q_w}{D_d \rho_1} \int_0^L \eta_\Sigma(x) \left| \frac{v_p(x) - v_d(x)}{v_d(x)} \right| dx\right), \quad (1)$$

где q_w — плотность орошения запыленного потока газа, кг/м³; η_Σ — коэффициент осаждения твердых частиц диаметром d_p на сферических каплях диаметром D_d ; ρ_1 — плотность воды, кг/м³; v_p — скорость частиц золы диаметром d_p , м/с; v_d — скорость капли диаметром D_d , м/с; L — длина трубы Вентури от среза форсунки до входа в каплеуловитель, м; x — координата вдоль оси трубы Вентури.

Из формулы (1) следует, что максимальная степень улавливания золы на каплях в трубе Вентури тем выше, чем большими оказываются значения величин q_w/D_d , η_Σ и $|(v_p - v_d)/v_d|$. Влияние двух последних величин на эффективность мокрого скруббера достаточ-

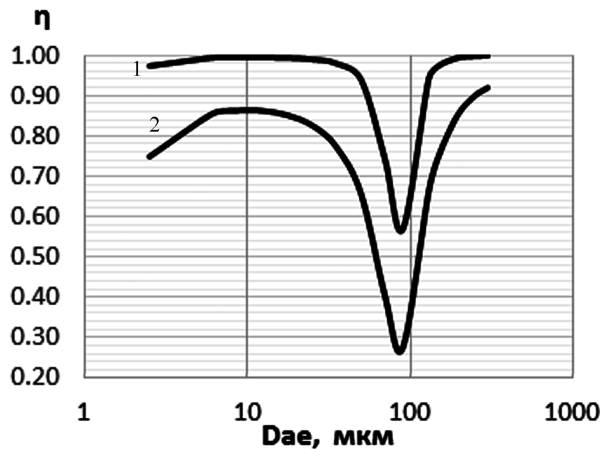


Рис.2. Фракционная эффективность η очистки ДГ каплями в трубе Вентури при $q_w = 0,16 \text{ кг/м}^3$ (кривая 1) и $q_w = 0,42 \text{ кг/м}^3$ (кривая 2).

но хорошо исследовано [7, 12, 15]. Предметом исследования в этой статье является более подробное изучение влияния величины q_w/D_d .

Поэтому дополнительно к полученным ранее в работах [11, 13] результатам расчетов с использованием математической модели (1) при умеренных расходах воды на орошение труб Вентури были проведены расчеты эффективности улавливания пыли каплями разного диаметра для данных таблицы при повышенной плотности орошения газового потока. На рис.2 приведены результаты расчета зависимости фракционной эффективности η очистки ДГ каплями в трубе Вентури от аэродинамического диаметра частиц пыли D_{ae} .

Кривая (1) иллюстрирует эффективность улавливания пыли каплями диаметром 150 мкм в трубе Вентури при плотности орошения ДГ $q_w = 160 \text{ г/нм}^3$. Кривая (2) соответствует эффективности улавливания пыли такими же каплями при $q_w = 420 \text{ г/нм}^3$. Видно, что с увеличением плотности орошения эффективность улавливания пыли размером от единиц до десятков микрон высока и приближается к единице (100%). Провалы кривых 1 и 2 соответствуют близости значений аэродинамических диаметров частиц пыли и капель, когда $|(v_p - v_d)/v_d| \rightarrow 0$, и частицы с каплями движутся в газовом потоке, не сталкиваясь. Однако капли и частицы такого размера (более 40 мкм) эффективно улавливаются далее по потоку в каплеуловителе скруббера.

Главная задача состоит в улавливании мелких частиц в трубе Вентури; в основном частиц класса PM_{10} и $PM_{2,5}$, которые плохо улавливаются большинством золоуловителей, за исклю-

чением тканевых фильтров. Как следует из рис.2, наиболее эффективно частицы летучей золы такого класса могут быть захвачены в трубе Вентури каплями при плотности орошения более 400 г/нм^3 .

Как следует из приведенных результатов, увеличение эффективности мокрых скрубберов с ростом плотности орошения очевидно. Однако исследование динамики физических процессов теплообмена и испарения капель в мокрых скрубберах Вентури может дать новые рекомендации по выбору эффективного соотношения расхода орошающей воды и размера капель. Для целей такого исследования трубу Вентури и каплеуловитель можно рассматривать как последовательные реакторы (см. рис.1), в которых влажосодержание и температура газовой фазы меняются вследствие испарения капель и уноса их на стенки каплеуловителя. Процессы теплообмена, связанные с испарением капель в таких реакторах, описываются приведенной ниже системой дифференциальных и алгебраических уравнений.

Для рассматриваемого диапазона температур, давления и влажности газовой и жидкой фаз испарение капель достаточно точно описывается известным уравнением Максвелла, которое для капли диаметром D_d [16] приобретает такой вид:

$$\frac{dD_d^2}{dt} = \frac{2 \text{Nu}_D D_{vg} \rho_{vg}}{\rho_l \mu_l} \ln \left[\frac{p_a - p_s}{p_a - p_\infty} \right], \quad (2)$$

Здесь давление насыщенного пара над поверхностью капли p_s связано с температурой капли T_d уравнением Клапейрона-Клаузиуса [17]:

$$p_s = p_a \exp \left[\frac{\lambda_s}{R_w} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_d} \right) \right], \quad (3)$$

где Nu_D — диффузионное число Нуссельта; D_{vg} — коэффициент диффузии пара в газе, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_{vg} — плотность паровоздушной смеси, кг/м^3 ; p_l — парциальное давление пара в газе, Па; μ_l — молекулярная масса воды, $\mu_l = 18 \text{ г/моль}$; p_a — атмосферное давление, Па; p_∞ — парциальное давление водяного пара в газовой фазе, Па; λ_s — удельная теплота парообразования, Дж/кг; R_w — газовая постоянная для пара, Дж/(кг·К), $R_w = R/\mu_l$; T_b — температура кипения воды, К; T_d — температура поверхности капли, К.

$$\text{Комплекс } \ln \left[\frac{p_a - p_s}{p_a - p_\infty} \right] \text{ в уравнении (2)}$$

управляет скоростью испарения капель в зависи-

мости от давления насыщенного пара над поверхностью капли и влагосодержания газовой фазы.

Уравнение зависимости влагосодержания D_v газовой фазы от плотности орошения q_w и диаметра капли D_d :

$$D_v(t) = D_v(0) + (q_w/\rho_g)(1 - D_d^3(t)/D_d^3(0)), \quad (4)$$

где D_v — влагосодержание дымовых газов, кг/кг; ρ_g — плотность дымовых газов, кг/м³.

Уравнение для температуры капли:

$$c_l \rho_l (D_d^3/6) (dT_d(t)/dt) = Nu_T \lambda_l [T_g(t) - T_d(t)] + \lambda_s \rho_l dD_d^3(t)/dt, \quad (5)$$

где c_l — теплоемкость воды, Дж/(кг·К); Nu_T — тепловое число Нуссельта; λ_l — теплопроводность воды, Дж/(с·м·К); T_g — температура газовой фазы, К.

Уравнение баланса тепла для определения температуры газа:

$$\left(c_g \cdot 0,92 + c_w \frac{D_v(t)}{1 + (\mu_g D_v(t)/\mu_l)} \right) \frac{p_a}{R_g T_g} \times \\ \times (T_g(0) - T_g(t)) + c_l q_w (T_g(0) - T_g(t)) \times \\ \times \frac{D_d^3(t)}{D_d^3(0)} - \lambda_s q_w \left(1 - \frac{D_d^3(t)}{D_d^3(0)} \right) = 0, \quad (6)$$

где c_g, c_w — теплоемкость дымовых газов и водяного пара, Дж/(кг·К); R_g — газовая постоянная для газа, Дж/(кг·К), $R_g = R/\mu_g$; μ_g — молекулярная масса дымовых газов, $\mu_g = 34$ г/моль.

Система уравнений (2)–(6) решается при таких начальных условиях: $D_d(t=0) = D_d(0)$ м; $D_v(t=0) = 0,046$ кг/кг; $T_g(t=0) = 423$ К; $T_d(t=0) = 293$ К.

В уравнение баланса тепла не вошло тепло, вносимое твердыми частицами, которое также расходуется на нагрев и испарение капель, а также тепло, расходуемое на подогрев пара от температуры T_d до температуры газа T_g . Согласно проведенным оценкам, вклад этих слагаемых в тепловой баланс равен долям процента, не оказывает существенного влияния на происходящие процессы и для упрощения уравнений не учитывался.

При проведении расчетов относительно изменения числа Нуссельта во времени было сделано следующее упрощающее предположение:

$$Nu_{D,T} = Nu_V [h(t) - h(t - \tau_V)] + \\ + Nu_0 [h(t - \tau_V) - h(t - \tau_d)], \quad t \in [0, \tau_d],$$

где Nu_V — усредненное по длине трубы Вентури значение числа Нуссельта; Nu_0 — число Нуссельта в спокойном газе. $Nu_0 = 2$; $h(t)$ — ступенчатая функция Хевисайда; τ_V — время пребывания газа в трубе Вентури; τ_d — время пребывания газа в каплеуловителе.

В таком предположении число Нуссельта представляется ступенчатой функцией с незначительным скачком на выходе из трубы Вентури для капель относительно малого диаметра $D_d < 70$ мкм, скорость которых почти выравнивается со скоростью газового потока на выходе трубы Вентури, но требующей дальнейшего уточнения для более массивных капель, скорость которых на выходе из трубы Вентури превышает скорость газа. Зависимость числа Нуссельта от времени можно рассчитать точно при переходе от переменных Лагранжа к переменным Эйлера, однако в общем случае такой переход может быть сопряжен с заметными вычислительными затруднениями.

Система уравнений (2)–(6) решалась численно с помощью прикладного пакета *Matematica* для капель разных размеров и для различных уровней орошения, как указано в таблице. Полученные результаты расчетов совместно с известными результатами позволяют сделать следующие выводы относительно оптимальных уровней плотности орошения и выбора предпочтительного диапазона размеров капель, которые изложены ниже.

Выбор оптимального размера капель

Рассмотрим диапазон размеров капель $D_d = 25$ –1000 мкм, который может быть реализован при распыле жидкости форсунками в трубе Вентури. На реальные размеры капель влияет ряд факторов. Размер капель зависит от давления транспортируемого агента и диаметра выходного устья форсунки [18, 19]. Причем ни одна форсунка не может обеспечить распыл жидкости в капли одного диаметра. За форсункой всегда будет реализовываться определенное распределение капель по размерам, которое при больших давлениях и малых устьях форсунки будет стремиться к логарифмически нормальному [20]. В инженерных расчетах более точным часто признается распределение Нукиямы-Танасавы [21].

При попадании капель в поток горячего газа с переменным полем скоростей распределение капель по размерам претерпевает дальнейшее изменение. Во-первых, более тяжелые капли вначале отстают от мелких, а затем начинают опережать их, и при определенных условиях возможно слияние капель; такие условия

возникают, по мнению Палатника [10], в трубах Вентури при плотностях орошения газового потока q_w более 1 л/м^3 . Во-вторых, мелкие капли, диаметром менее 70 мкм , при высокой температуре, малых расходах жидкости и не слишком высокой влажности газового потока достаточно быстро начинают испаряться. Пример расчета эволюции распределения капель по размерам при их испарении в среде с постоянным влагосодержанием приведен в статье [22]. В общем случае исходная функция распределения капель по размерам в скруббере Вентури эволюционирует в результате испарения и возможного дробления индивидуальных капель, либо вследствие столкновения (слияния) мелких и крупных капель, а также осаждения на них частиц пыли.

Высокая скорость газа в горловине трубы Вентури является причиной дробления крупных капель. Возможность распада капли жидкости с коэффициентом поверхностного натяжения σ определяется по критическому числу Вебера [23]:

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

Капли начинают дробиться при числах Вебера, лежащих в диапазоне $We = 5-30$ [ibid.]. Для характерных скоростей в горловине промышленных труб Вентури ($60-80 \text{ м/с}$) дробятся капли диаметром более 300 мкм , что подтверждается расчетами в статье [11], а Палатник [10], например, в своих экспериментах с промышленными трубами Вентури вообще не наблюдал за ними капель диаметром более 300 мкм . Поскольку капли являются мишенями для частиц пыли, то для лучшего улавливания размер капель вследствие их испарения или дробления не должен заметно сокращаться за время пребывания в трубе Вентури.

Из приведенных выше соображений следует, что размеры капель в промышленных скрубберах Вентури должны находиться в диапазоне диаметров $70 \text{ мкм} < D_d < 300 \text{ мкм}$. Однако даже в этом диапазоне следует выделить характерный размер капель, при котором и по данным теоретических расчетов [11, 13], и инженерных расчетов при проектировании мокрых скрубберов Вентури [14], и по результатам испытаний промышленных золоулавливающих установок с трубами Вентури на ТЭС [7, 10] наблюдается наиболее высокая степень улавливания частиц летучей золы. Это капли диаметром около 150 мкм , поэтому желательно, чтобы максимум распределения капель по размерам, формируемого форсунками, приходился на кап-

ли такого диаметра. При одинаковых условиях капли такого размера испаряются слабее [24], чем, например, капли диаметром менее $50-70 \text{ мкм}$. В связи с этим не требуется внесения поправок в уравнения их движения в газе вследствие изменения размера капель при их испарении.

Расход воды на орошение

При умеренных расходах воды (например, $q_w = 0,160 \text{ кг/м}^3$) относительно небольшое в таком случае количество капель достаточно быстро нагревается окружающим их горячим газом (рис.3, а, кривая 1). По этой причине давление насыщенного пара p_s у поверхности капель начинает возрастать. Температура капель обеспечивает производство большего количества пара на их поверхности для начала процесса

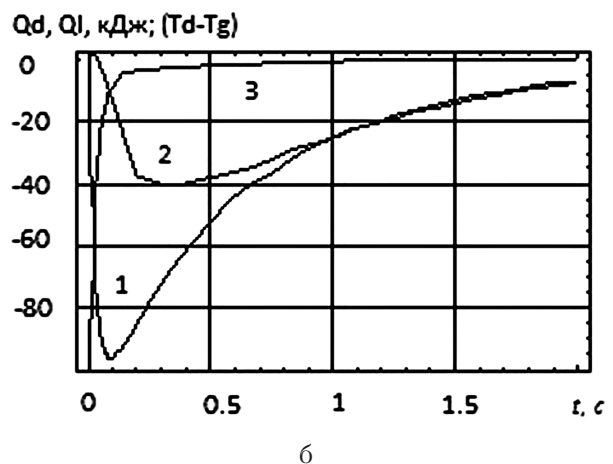
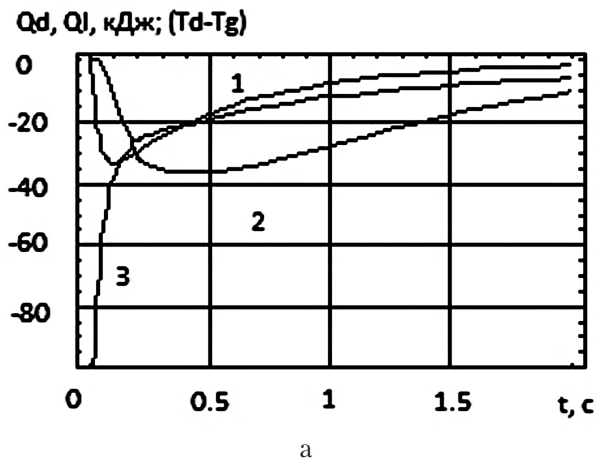


Рис.3. Динамика поглощения тепла каплями $D_d = 150 \text{ мкм}$: нагрев (1), испарение (2) и разность температур $[T_d - T_{g_i}]$ капли и газа (3) при плотностях орошения $q_w = 0,160 \text{ кг/м}^3$ (а) и $q_w = 0,700 \text{ кг/м}^3$ (б).

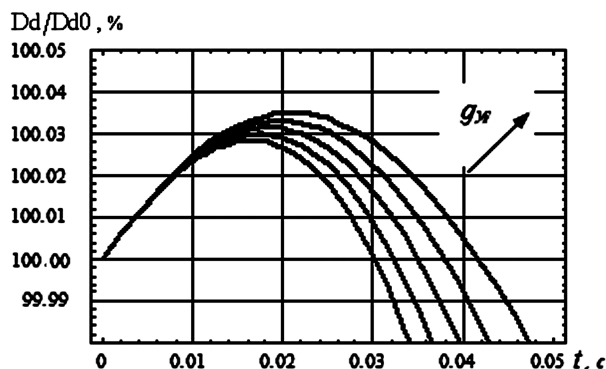


Рис.4. Динамика изменения относительного диаметра капель в трубе Вентури при конденсации и начале испарения при плотностях орошения $q_w = 0,075; 0,225; 0,375; 0,525; 0,675 \text{ кг/м}^3$.

интенсивной диффузии пара в газовую фазу (см. уравнение (3)); процесс испарения длится дольше (рис.3, а, кривая 2) и более интенсивен, поскольку разность температур газа и капель поддерживается достаточно долго (рис.3, а, кривая 3); в итоге большая часть тепла дымовых газов при небольших плотностях орошения расходуется на испарение капель, а их размер сокращается (для капель диаметром 150 мкм приблизительно на 10 % за время пребывания в трубе Вентури $\tau_v = 200 \text{ мс}$).

При повышенных расходах воды (например, $q_w = 0,700 \text{ кг/м}^3$) картина меняется. В этом случае гораздо большее количество тепловой энергии дымовых газов расходуется на нагрев капель, чем на испарение (рис.3, б, кривые 1 и 2). Ввиду их значительно большего количества, чем при малых и умеренных плотностях орошения, капли быстро отнимают большее количество тепла у дымовых газов и происходит «захолаживание» газовой фазы: тепловая энергия дымовых газов быстро расходуется на нагрев капель, что приводит к такому же быстрому снижению температуры газа и разности температур газа и капель (рис.3, б, кривая 3). В результате капли испаряются менее интенсивно. Так, для капель диаметром 150 мкм их диаметр в скруббере Вентури при расходе $q_w = 0,700 \text{ кг/м}^3$ сокращается лишь приблизительно на 1 % (а не на 10 %, как в случае $q_w = 0,160 \text{ кг/м}^3$).

В случае заметного сокращения размера капель в трубе Вентури, что наблюдается для мелких капель и умеренных расходов воды на орошение, численная модель должна подвергаться корректировке, поскольку в принятой модели (см. формулу (1)) значения скоростей движения капель относительно потока газа и частиц пыли, по которым определяются эффек-

тивность улавливания и число Нуссельта, рассчитаны при условии $D_d = \text{const}$. Результаты расчетов относительных скоростей капель, частиц пыли и газа в трубе Вентури для данных таблицы при $q_w = 160 \text{ мл/м}^3$ приведены в работе [11]. С применением повышенных расходов воды на орошение из-за более слабого испарения капель это условие выполнено с достаточной точностью, и математическая модель в целом оказывается более точной.

Следует специально отметить важный эффект, который проявляется непосредственно после впрыска капель в трубу Вентури и влияет на динамику процессов теплообмена в гетерогенном потоке. Момент начала испарения попавших в газовый поток капель оказывается несколько отсроченным, поскольку на изначально более холодных каплях в течение некоторого времени происходит конденсация влаги из газовой фазы (рис.4). Затягивание момента перехода от конденсации к испарению дает возможность каплям прогреться, отобрав при этом тепло у газа, что снижает разность температур между газом и каплями. В результате процесс испарения капель при повышенных уровнях орошения становится менее интенсивным, что хорошо видно из сравнения рис.3,а и рис.3,б.

Важным выводом из сравнения результатов расчетов для случаев умеренных и повышенных расходов воды на орошение является то, что подавляемое при высоких уровнях орошения испарение капель приводит к меньшему результирующему влагосодержанию дымовых газов (рис.5). Это неочевидный, на первый взгляд, вывод, но при увеличении количества впрыскиваемой в трубу Вентури воды влажность дымовых газов на выходе из скруббера, действительно, снижается по сравнению с вариантами уме-

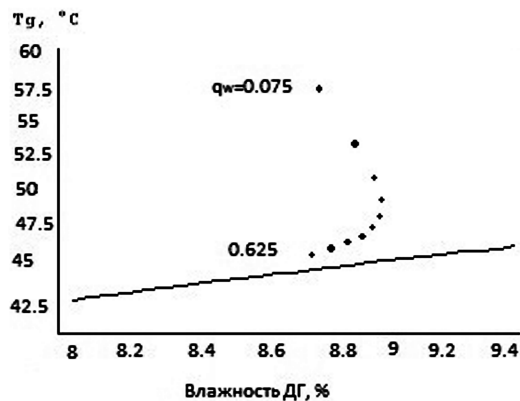


Рис.5. Кривая насыщения (сплошная) и точки, показывающие температуру и объемное содержание пара в дымовых газах на выходе скруббера Вентури при плотностях орошения $q_w = 0,075; 0,225; 0,375; 0,525; 0,675 \text{ кг/м}^3$.

ренного орошения. Это означает, что скруббер Вентури с повышенной плотностью орошения выбрасывает в атмосферу меньшее количество воды. При уровнях орошения 420 г/нм^3 на очистку дымовых газов от пыли котла тепловой мощностью 100 МВт (расход дымовых газов 100 тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$) расходуется около 50 т/ч воды. По оценкам [5], потери воды на испарение в мокрых скрубберах Вентури составляют приблизительно 30 г/м^3 сухих дымовых газов. Тогда для такого котла потери влаги в атмосферу составляют до 3 т/ч, то есть более 5 %. По данным расчетов (уравнения (2)–(5)), в принятой в этой статье модели потери воды на испарение при повышенных плотностях орошения могут оказаться еще меньшими, если также учесть быстрый уход капель на стенки в каплеуловителе.

Если газовый поток не будет достаточно охлажден высоким расходом воды, то влага продолжит испаряться с водяной пленки, стекающей со стенок каплеуловителя. Однако возможны условия, когда, наоборот, влага будет конденсироваться на водяной пленке каплеуловителя. Расчет теплообмена и испарения капель в каплеуловителе является отдельной интересной задачей и требует дополнительного моделирования. В условиях возможного дефицита водных ресурсов вблизи проектируемой ТЭС снижение потерь воды на испарение может оказаться фактором пополнения запаса оборотного водоснабжения системы орошения труб Вентури.

Гидродинамическое сопротивление мокрого скруббера Вентури

При установке системы мокрой сероочистки после золоуловителя ограничение на влагосодержание ДГ не налагается, что позволяет наращивать расход орошающей жидкости без опасения достижения точки росы. Повышение расхода орошающей жидкости может потребоваться также и для поддержания высокой степени эффективности пылеочистки в случае снижения мощности котла в маневренном режиме. Однако увеличение плотности орошения приводит к увеличению гидродинамического сопротивления трубы Вентури и мокрого скруббера в целом. Расчетные формулы для гидродинамического сопротивления трубы Вентури, приведенные в [15], позволяют производить расчет с достаточной точностью лишь для умеренных уровней орошения $q_w = 150\text{--}240 \text{ г/нм}^3$. Поэтому были проведены дополнительные оценки гидродинамического сопротивления при повышенных плотностях орошения газового потока. Согласно экспериментальным данным [25], гидродина-

мическое сопротивление МСВ при плотности орошения 160 г/нм^3 составляет $\Delta H = 1250 \text{ Па}$, а при повышении плотности орошения до $q_w = 500 \text{ г/нм}^3$ гидродинамическое сопротивление возрастает почти вдвое: $\Delta H = 2250 \text{ Па}$.

Для электростатических фильтров снижение скорости ДГ при пониженных нагрузках энергоблока приводит к росту эффективности пылеочистки за счет увеличения времени пребывания частиц в поле коронного разряда [26], однако в случае мокрых скрубберов Вентури снижение скорости ДГ в горловине трубы ведет к ухудшению пылеочистки и должно быть скомпенсировано ростом расхода орошающей жидкости, что, в свою очередь, приводит к повышению гидродинамического сопротивления, необходимости увеличения мощности дымососа и связанными с этим дополнительными энергозатратами энергетической установки.

Влияние функции распределения частиц летучей золы по размерам

Ужесточение требований к пороговым значениям выбросов пыли от 50 до 20 мг/нм^3 (Директива 2010/75/EU) обуславливает необходимость повысить эффективность МСВ от 99,85 до 99,95 %. Как показали расчеты по представленной математической модели, результаты вычислений эффективности мокрого скруббера сильно зависят от входного распределения частиц летучей золы и от распределения капель по размерам.

Так, например, при сжигании газовых углей не требуется столь тонкий помол, как для антрацитов. В результате распределение частиц летучей золы по размерам за котлами в случае сжигания газовых углей смещено в сторону более крупных частиц, которые лучше улавливаются в трубе Вентури и каплеуловителем. В связи с этим более высокой степени пылеочистки для золы таких углей можно достичь при меньших плотностях орошения запыленного газового потока. При этом потери на гидродинамическое сопротивление будут ниже, а экономические показатели очистки дымовых газов выше. Расчеты показывают, что при очистке ДГ от частиц летучей золы при сжигании антрацитов и тощих углей, когда на частицы PM10 приходится до 10 % массы золы, требования Директивы 2010/75/EU достижимы при плотностях орошения трубы Вентури $q_w > 500 \text{ г/нм}^3$. Неопределенность распределения частиц летучей золы за котлами и капель за форсунками не позволяет с точностью до сотых долей процента рассчитать требуемую эффективность

скруббера на уровне 99,9 %. Однако знание входного распределения частиц по размерам позволит точнее определить технологические параметры орошения газового потока.

Выводы

Приведены результаты математического моделирования процесса очистки дымовых газов от частиц летучей золы в мокрых скрубберах Вентури в условиях избыточного орошения. Исследована динамика основных теплофизических параметров гетерогенного потока в среде с изменяющимся влагосодержанием. Рассмотрено влияние диаметра капель на эффективность мокрых скрубберов. Исследовано изменение гидродинамического сопротивления мокрого золоуловителя при разных плотностях орошения газового потока. Оценено влияние входного распределения частиц летучей золы по размерам на результат пылеочистки.

Приведенные в этой статье результаты расчетов и выявленные физические особенности тепломассообмена в мокрых скрубберах с трубой Вентури в условиях избыточного орошения могут быть полезными при проектировании установок очистки дымовых газов крупных сжигающих установок.

Список литературы

1. Про Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 796-р. — <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-p>.
2. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. Official Journal of the European Communities, L 309/1, 27.11.2001.
3. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), OJ L 334, 17.12.2010.
4. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапоніч Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетиці України. Київ : ГНОЗІС, 2013. 308 с.
5. Кропш Л.И., Харьковский М.С. Мокрое золоулавливание в условиях оборотного водоснабжения. М. : Энергия, 1980. 112 с.
6. Аничков С.Н., Гиниятуллин Р.И., Зыков А.М. Повышение эффективности улавливания летучей золы в аппаратах мокрого золоулавливания. *Электрические станции*. 2009. № 8. С. 59–62.
7. Кропш А.И., Акбрут Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. М. : Энергия, 1977. 460 с.
8. Costa M.A., Ribeiro A.P., Tognetti E.R., Aguiar M.L., Goncalves J.A.S., Coury J.R. 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.
9. 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.
10. Палатник И.Б. Пылеуловители с трубами-коагуляторами Вентури. Алма-Ата : Наука, 1981. 208 с.
11. Вольчин И.А., Ращепкин В.А. Математическое моделирование процессов коагуляции частиц летучей золы с каплями жидкости в трубах Вентури мокрых скрубберов ТЭС. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2012. № 2. С. 44–53.
12. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. М. : Металлургия, 1988. 256 с.
13. Вольчин И.А., Ращепкин В.А. Влияние уровня нагрузки котлоагрегата ТЭС и расхода орошающей воды на эффективность мокрого скруббера Вентури. *Энергетика и электрификация*. 2012. № 10. С. 24–28.
14. Акбрут А.И. Указания по расчету и проектированию золоуловителя с трубой Вентури типа МВ при модернизации газоочистного оборудования тепловых электростанций. М. : Уралтехэнерго и Всесоюзный теплотехнический институт им. Ф.Э. Держинского, 1979. 27 с.
15. Flagan R.C., Seinfeld J.H., Fundamentals of Air Pollution Engineering. California Institute of Technology. PRENTICE HALL, 1988. 542 p.
16. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. *Итоги науки и техники. Сер. Физико-математические науки*. М. : Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1. С. 91–99.
17. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М. : Энергоатомиздат, 1983. 416 с.
18. Пажи Д.Г., Галузов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М. : Химия, 1984. 256 с.
19. Perry R.H., Green D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. The Mac-Grow Hill Companies, Inc., 1999. 2582 p.
20. Колмогоров А.Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. *Доклады АН СССР*. 1941. Т. 31. Вып. 2. С. 99–101.
21. Babinsky E., Sojka P.E. [Modelling drop size distributions]. *Progress in Energy and Combustion Science*. Pergamon Press. 2002. Vol. 28. pp. 303–329.
22. Вольчин И.А., Карацуба А.С., Ращепкин В.А. Эволюция функции распределения капель по размерам при орошении запыленного потока горячих отходящих газов водным аэрозолем. *Новини енергетики*. 2009. № 12. С. 17–23.
23. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М. : Наука, 1987. Т. 1. 464 с.

24. Ращепкін В.А. Процеси уловлення дрібних частинок легкої золи у зололовлювачах ТЕС : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2013. 24 с.
25. Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. Справочник по пыле- и золоулавливаю. М. : Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
26. Корчевой Ю.П., Вольчин И.А., Ращепкин В.А. и др. Оценка повышения эффективности электростатических фильтров при предварительной зарядке твердых частиц. *Экотехнологии и ресурсозбережение*. 1999. № 5. С. 62–67.

Поступила в редакцию 19.06.18

Вольчин І.А., докт. техн. наук, **Ращепкін В.А.,** канд. техн. наук
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Особливості очищення димових газів у мокрих скруберах з трубою Вентурі в умовах надлишкового зрошення

Радикальне збільшення щільності зрошення потоку димових газів у мокрих скруберах Вентурі дає можливість істотно підвищити ефективність таких зололовлювачів до рівня дотримання європейських вимог щодо викидів пилу. Така зміна режиму роботи помітно впливає на характер процесів тепломасопереносу та має особливості, які важливо враховувати при реконструкції та проектуванні установок мокрою пилоочищення газів. Наведено результати математичного моделювання процесу очищення димових газів від частинок легкої золи у мокрих скруберах Вентурі в умовах надлишкового зрошення. Досліджено динаміку основних теплофізичних параметрів гетерогенного потоку в середовищі із змінним вмістом вологи. Розглянуто вплив діаметра крапель на ефективність мокрих скрубєрів. Досліджено зміну гідродинамічного опору мокрого зололовлювача при різній щільності зрошення газового потоку. Оцінено вплив вхідного розподілу часток легкої золи за розмірами на результат пилоочищення. *Бібл. 26, рис. 5, табл. 1.*

Ключові слова: пилоочищення, летка зола, скрубєр Вентурі, щільність зрошення, гідродинамічний опір.

Volchyn I.A., Doctor of Technical Sciences,
Raschepkin V.A., Candidate of Technical Sciences
Coal Energy Technology Institute of NAS of Ukraine, Kiev
19, Andriivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Specific Issues of Flue Gas Cleaning in Wet Venturi Scrubbers at Excess Spraying

The radical increase in the density of spraying the flue gas stream in wet Venturi scrubbers allows to significantly increase the efficiency of these dust precipitators to the level of compliance with the European requirements for dust emissions. Such a shift in the operating mode significantly affects the nature of the processes of heat and mass transfer and has features that are important to consider when reconstructing and designing wet gas cleaning plants. The mathematical modeling of the process of flue gas cleaning from fly ash particles in wet Venturi scrubbers in the conditions of excess spraying is performed, the dynamics of the main thermophysical parameters of the heterogeneous flow in a medium with variable moisture content and the influence of the droplet diameter on the efficiency of wet scrubbers are investigated. The problem of changing hydrodynamic resistance of a wet scrubber at different gas flow spraying densities has been studied; the effect of the input fly ash particles distribution on the result of dust cleaning is estimated. *Bibl. 26, Fig. 5, Tab. 1.*

Key words: dedusting, fly ash, Venturi scrubber, spray density, hydrodynamic resistance.

References

1. [On the National Emission Reduction Plan for the Large Combustion Plants. Decision of the Cabinet of Ministers of Ukraine]. No. 796-p. dated 8 Nov., 2017. — <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-p>. (Ukr.)
2. Directive 2001/80 / EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. Official Journal of the European Communities, L 309/1, 27.11.2001.
3. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), OJ L 334, 17.12.2010.
4. Volchyn I.A., Dunaevska N.I., Gaponich L.S., Cherniavsky M.V., Topal O.I., Zasyadko Ya.I. Perspektivy vprovadzhennya chystykh vuhilnykh tekhnolohiy v enerhetytsi Ukrainy [Prospects for the introduction of clean coal technologies in the energy sector of Ukraine]. Kiev : GNOZIS, 2013. 308 p. (Ukr.)
5. Kropp L.I., Kharkovsky M.S. [Wet ash collecting in conditions of recycled water supply]. Moscow : Energia, 1980. 112 p. (Rus.)
6. Anichkov S.N., Giniyatullin R.I., Zykov A.M. [Increase of the efficiency of fly ash capture in devices of wet ash collecting]. *Elektricheskiye stantsii [Electric stations]*. 2009. No. 8. pp. 59–62. (Rus.)
7. Kropp A.I., Akbrut L.I. [Ash precipitators with Venturi tubes at thermal power plants]. Moscow : Energia, 1977. 460 p. (Rus.)
8. Costa M.A., Ribeiro A.P., Tognetti E.R., Aguiar M.L., Goncalves J.A.S., Coury J.R. Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Fine Powder from a Confined Gas Stream. *Materials Research*. 2005. 8 (2). pp. 177–179.
99. Ravi G., Gupta S.K., Viswanathan S., Ray M.B. Optimization of Venturi Scrubbers Using Genetic Algorithm. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. 41. pp. 2988–3002.
10. Palatnik I.B. [Dust collectors with Venturi-coagulation tubes]. Alma-Ata : Nauka, 1981. 208 p. (Rus.)
11. Volchyn I.A., Raschepkin V.A. [Mathematical modeling of the processes of coagulation of fly ash particles with droplets of liquid in Venturi tubes of wet scrubbers of thermal power plants]. *Energotekhnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2012. No. 2. pp. 44–53. (Rus.)
12. Belousov V.V. [Theoretical bases of gas cleaning processes]. Moscow : Metallurgy, 1988. 256 p. (Rus.)
13. Volchyn I.A., Raschepkin V.A. [Influence of the load level of the boiler unit of the TPP and the flow of irrigation water on the efficiency of the wet Venturi scrubber]. *Energetika i elektrifikatsiya. [Power and Electrification]*. 2012. No. 10. pp. 24–28. (Rus.)
14. Akbrut A.I. [Guidelines for the calculation and design of a ash collector with a Venturi-type tube during modernization of gas-cleaning equipment of thermal power plants]. Moscow : Uraltekhenergo i Vsesoyuznyy teplotekhnicheskii institut im. F.E. Dzerzhinskogo, 1979. 27 pp. (Rus.)
15. Flagan R.C., Seinfeld J.H., Fundamentals of Air Pollution Engineering. California Institute of Technology. PRENTICE HALL, 1988. 542 p.
16. Fuchs N.A. [Evaporation and growth of droplets in a gaseous medium]. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya Fiziko-matematicheskiiye nauki. [The results of science and technology. Ser. Physics and mathematics]*. Moscow : Izdatelstvo AS USSR, 1958. 1. pp. 91–99. (Rus.)
17. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E. [Technical thermodynamics]. Moscow : Energoatomizdat, 1983. 416 p. (Rus.)
18. Pazhi D.G., Galustov V.S. Fundamentals of spraying of liquids. Moscow : Khimiya, 1984. 256 p. (Rus.)
19. Perry R.H., Green D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. The Mac Grow Hill Companies, Inc., 1999. 2582 p.
20. Kolmogorov A.N. [On the logarithmic-normal law of the distribution of particle sizes during crushing]. *Doklady AN USSR*. 1941. 31. Iss. 2. pp. 99–101. (Rus.)
21. Babinsky E., Sojka P.E. Modeling drop size distributions. *Progress in Energy and Combustion Science*. Pergamon Press. 2002. 28. pp. 303–329.
22. Volchyn I.A., Karatsuba A.S., Raschepkin V.A. [Evolution of the droplet size distribution function upon spraying of a dusty flow in hot exhaust gases with a water aerosol]. *Novyny enerhetyky [News of energy]*. 2009. No. 12. pp. 17–23. (Rus.)
23. Nigmatulin R.I. [Dynamics of multiphase media]. Moscow : Nauka, 1987. 1. 464 p. (Rus.)
24. Raschepkin V.A. [Processes of fine fly ash particles removal in the thermal power plants : Abstract of dissertation ... candidate of technical sciences]. Kiev, 2013. 24 p. (Ukr.)
25. Birger M.I., Waldberg A.Yu., Myagkov B.I. Handbook of dust and ash collecting. Moscow : Energoatomizdat, 1983. 312 p. (Rus.)
26. Korchevyy Yu.P., Volchyn I.A., Raschepkin V.A., Domansky S.G., Gusar N.G. [Estimation of increasing the efficiency of electrostatic filters with pre-charging of solid particles] *Ecotekhnologii i resursosberezhenie [Ecotechnologies and Resource Saving]*. 1999. No. 5. pp. 62–67. (Rus.)

Received June 19, 2018