

Теплофизика и Аэромеханика

- ♦ гидрогазодинамика
- ♦ тепломассообмен
- ♦ турбулентность
- ♦ средства и методы аэро- и теплофизического эксперимента
- ♦ физика низкотемпературной плазмы
- ♦ физико-технические проблемы энергетики

УДК 538.248.2

Улавливание пыли из пылепарогазовой смеси в конденсаторе с наклонными трубами

Л.В. Романова¹, И.И. Гогонин²

¹Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: gogonin@itp.nsc.ru

В данной статье представлены результаты исследований по улавливанию твердых частиц и капель на поверхности наклонных труб при конденсации пара из парогазовых выбросов сульфат-целлюлозного производства в газоочистном конденсаторе.

Ключевые слова: влажный пар, щелочные капли, пылевые частицы, пылепароочистительный конденсатор.

Введение

Основным источником загрязнения атмосферы высоковлажными запыленными выбросами, содержащими широкий спектр серосодержащих примесей, в сульфат-целлюлозном производстве является содорегенерационный котлоагрегат (СРК) и его технологический узел — бак-растворитель плава. Режим работы, состав и количество плава из растворителя плава СРК зависят от: процесса растворения раскаленного плава в жидкости; мгновенного выделения значительного количества парогазовой смеси, особенно при больших стоках плава; непрерывности и неравномерности подачи плава и белого щелока в растворитель плава; количество подсосов воздуха. Процесс растворения плава (солей натрия), температура которого часто превышает 900 °С, происходит в растворе щелока с температурой 60–70 °С и сопровождается микро- и макровзрывами [1–3]. Для уменьшения мощности тепловых взрывов плав при истечении из летки дробится острым паром и щелоком, струи которого на выходе из кольцевой гребенки направлены внутрь кольца [3, 4]. В результате контакта плава и холодного щелока возникает дополнительное количество пара, который удаляется в атмосферу через вытяжные трубы. Влажный пар содержит щелочные капли, до 2 % пылевых частиц (в основном карбоната натрия) и от 5 до 30 % воздуха, а также сероводород и сернистый ангидрид в количестве около 0,005 % каждого. В среднем количество выбросов из растворителя плава составляет 226 м³ на каждую тонну вырабатываемой целлюлозы.

Авторы данного сообщения запатентовали [5–7] и внедрили на ряде предприятий способ, позволяющий исключить выбросы капельной влаги в атмосферу и снизить унос пылевых частиц и серосодержащих примесей. Устройство представляет собой пылегазоочистной конденсатор с наклонными трубами, который располагается на входе парогазовых выбросов в вытяжную трубу. Описание устройства и его характеристики изложены в работе [7]. Парогазовая смесь поступает в межтрубное пространство конденсатора снизу и движется вверх за счет самотяги вытяжной трубы. Расположение трубного пучка под углом $15\text{--}30^\circ$ к горизонту позволяет устойчиво отводить образовавшийся конденсат по трубам до трубной доски. При этом ликвидируется режим захлебывания, который имеет место при горизонтальном расположении труб и встречном течении пара и жидкости в конденсаторе. Полностью открытая нижняя стенка конденсатора обеспечивает равномерное распределение парогазовых выбросов по всему сечению на входе в аппарат. В работе [7] опубликованы некоторые результаты экспериментальных исследований, проведенных на ОАО «Сеgezский ЦБК», и приведены данные химических анализов отходящих газов после установки конденсатора.

Характеристика пыли из растворителя плава СРК

Для определения размеров частиц существует ряд методов: счетные, оптические, электрические методы [8], седиментация, применение микросъемки. Методы определения дисперсного состава пылевых частиц, находящихся во взвешенном состоянии в газообразной среде, имеют общую особенность: анализ не должен нарушать целостности агрегатов [8, 9], частиц дисперсной фазы [9].

При выборе метода определения размеров частиц учитывался ряд особенностей исследуемой пыли:

- высокая растворимость в воде частиц, состоящих, в основном, из солей натрия;

- высокая влажность и повышенная температура парогазовой смеси.

Эти особенности не позволили использовать при исследовании количества пыли другие методы.

После анализа имеющихся методов определения дисперсного состава пыли были выбраны следующие:

- стандартный метод внутренней фильтрации, основанный на улавливании пылевых частиц на стекловолно, помещенное в стеклянный патрон (см. [9]);

- счетный метод, основанный на улавливании пыли на поверхность и микроскопировании полученных образцов.

Схема отбора пыли методом внутренней фильтрации показана на рис. 1. Схема включает стеклянный патрон-фильтр для определения количества пылевого уноса и измерительную диафрагму расхода выбросов. Для замеров использовались стеклянные патроны, заполненные стекловатой, диаметром входных отверстий 4,5–5,5 мм и измерительные диафрагмы с коэффициентом $C = 1,0\text{--}1,3$.

Счетный метод улавливания пыли на поверхность реализовывался двумя способами, разработанными в ходе экспериментов:

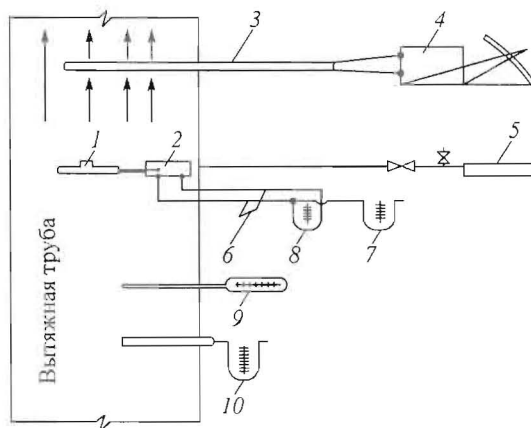
- осаждение частиц пылевого уноса на листе фильтровальной бумаги;

- отбор проб на стеклянные пластины, предварительно обработанные тонким слоем прозрачного быстросохнущего эпоксикаучукового клея.

Для определения качественного состава пылевого уноса был разработан метод фиксирования парогазовой смеси на фильтровальной бумаге. Данный метод был опробован в работе [10], где показал хорошие результаты. Он позволяет избежать разрушения и растворения улавливаемых частиц за счет впитывания влаги

Рис. 1. Схема отбора пылевого уноса методом внутренней фильтрации.

1 — патрон-фильтр, 2 — измерительная диафрагма, 3 — пневмометрическая трубка, 4 — микроманометр, 5 — воздушная, 6 — соединительные шланги, 7, 8, 10 — U-образные манометры, 9 — термометр.



выбросов бумажной основой, дает возможность получить качественную характеристику пылевых частиц парогазовой смеси и качественно определить распределение температуры частиц по размерам.

Метод заключается в естественном осаждении частиц на листе плотной фильтровальной бумаги, вводимом в поток парогазовой смеси через отверстие в крышке бака плава СРК с помощью рамки размером 210×290 мм. Закрепленный на рамке лист остается в отверстии крышки бака плава СРК в течение 1 секунды. В эксперименте использовалась стандартная фильтровальная бумага белого цвета формата 210×297 мм. Экспериментальные листы со следами пылевого уноса высушивались, разбивались на участки размером 25×25 мм и сканировались с использованием сканера марки Epson*** и PC AMD Athlon частотой 1100 МГц (см. рис. 2).

Для количественной характеристики пыли был использован способ отбора на стеклянные пластины. На поверхность пластин размером 25×70 мм был нанесен тонкий слой двухкомпонентного эпоксикаучукового клея «ЭпоксиПросвет-2 (оптический)». Стеклянные пластины, установленные в направляющее устройство, вводились обработанной клеем стороной в газоход навстречу потоку парогазовой смеси. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

Данный метод позволил фиксировать на слое клея твердые частицы пылевого уноса, присутствующие в потоке. Уловленные таким образом частицы изучались и фотографировались под микроскопом, обрабатывались счетным путем. Достоинством метода является возможность увидеть форму и цвет пылевых частиц. Оценка размеров частиц проводилась путем замера наибольшего размера каждой частицы. Погрешность данного метода составляет 6 % [11].

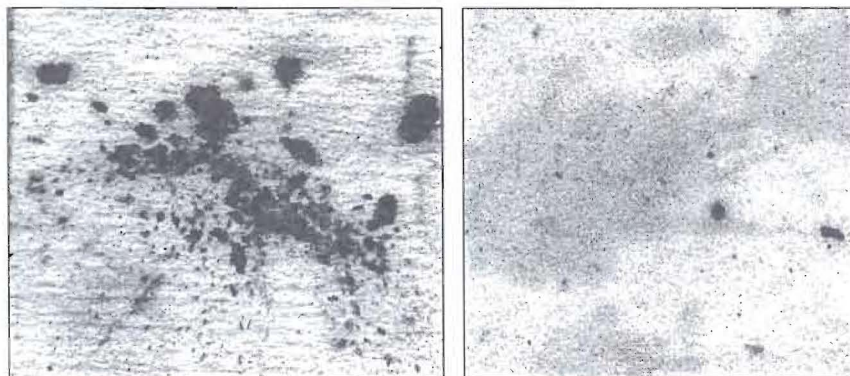


Рис. 2. Образцы фильтровальной бумаги 25×25 мм после отбора проб дисперсности пылевого уноса. Увеличение в 5 раз.

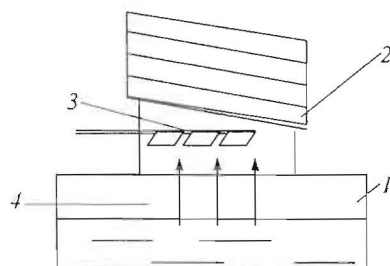


Рис. 3. Схема отбора проб пыли на стеклянные пластины.

1 — бак-растворитель плава, 2 — газоочистный конденсатор, 3 — направляющая с закрепленными специальными стеклами, 4 — парогазовая смесь.

На рис. 4 показаны фотографии уловленных частиц. После сканирования и аналитической обработки полученных образцов стали видны следы частиц различной формы и размеров.

Размеры мелких раскаленных частиц составили 50–100 микрон, а крупные рыхлые частицы с меньшей температурой достигли 1,5–2 мм. Они явились агломератами частиц более мелких фракций, связанных между собой силами адгезии и частично оплавленных при столкновении друг с другом (рис. 4, кадр 5).

Пылевые частицы, уловленные на стекловолочке, представляют собой белые кристаллы сферической формы. Размеры кристаллов составляют 100–2000 мкм. Дисперсная характеристика состава пылевых частиц (весовая), построенная по экспериментальным данным, приведена на рис. 5.

Метод фиксирования растворимой пыли на фильтровальной бумаге по итогам экспериментов признан наиболее точным и корректным. Он позволил избежать разрушения и растворения улавливаемых частиц за счет впитывания влаги выбросов бумажной основой, дал возможность получить качественную и количественную характеристику пылевых частиц в парогазовом потоке, позволил качественно определить распределение температуры частиц по размерам. Анализ размеров частиц нерастворенного остатка из поглотителей Рихтера показал, что характерный размер частиц нерастворенного остатка составляет 150 мкм (рис. 6, кадр 1).

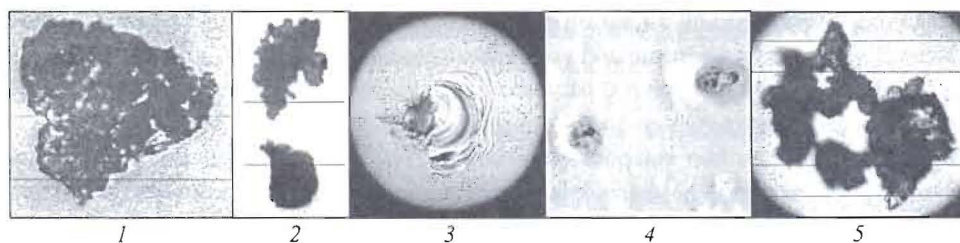


Рис. 4. Формы и размеры пылинок в паровоздушном потоке из бака-растворителя плава.

1, 2 — пылинки различной формы, 3 — пылинка, подлетевшая на скорости к стеклянной пластине и сдвинувшая слой клея, 4 — частицы различного размера и цветности на стеклянной пластине, 5 — агломерат пылинок.

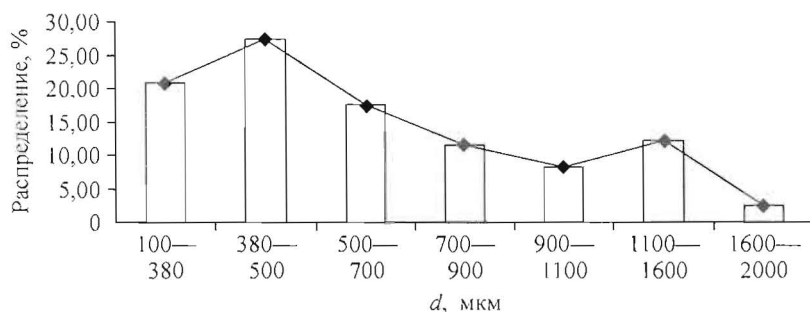


Рис. 5. Дисперсная характеристика состава пылевых частиц (весовая).

На экспериментальных листах отчетливо видны следы капель и пылевых частиц различного размера. Размеры капель значительно превышают размеры частиц. Крупные капли светлого цвета с характерным размером 3–4 мм представляют собой капли зеленого щелока, образующиеся при тепловых взрывах. Более мелкие капли черного цвета (300–950 мкм), расположенные на листах в виде тесных образований, представляют собой брызги плава, образующиеся при всплесках в результате тепловых взрывов.

На экспериментальных листах хорошо видны фиксированные следы осажденных частиц и капель. Эти следы позволяют сделать выводы о неравномерности распределения дисперсной фазы в потоке. Тепловой взрыв возникает при контакте струи плава, имеющего температуру около 900 °С, с жидкостью в баке, имеющей температуру 70 °С.

На листах фильтровальной бумаги видны следы глубокого ожога раскаленными частицами. Более темный оттенок обожженной бумаги наблюдается вокруг частиц, размерами не превышающими 190 мкм. Более крупные частицы глубоких следов ожога на бумаге не оставляют, что свидетельствует об их меньшей температуре. Частицы размеров порядка 1,5–2 мм можно рассматривать как агломераты частиц более мелких фракций, связанных между собой силами адгезии и частично оплавленных при столкновении друг с другом.

Темный оттенок бумаги вокруг пылевых частиц свидетельствует об их высокой температуре по сравнению с температурой потока. Хотя распределение температуры частиц не равномерное, фотографии позволяют сделать вывод о том, что температура пылевых частиц достаточно высока для исключения конденсации на них водяных паров и их растворения в парогазовом потоке.

В ходе эксперимента было замечено, что извлеченная из-под крышки бака плава изначально белая бумага имела серую либо зеленоватую окраску, а после пребывания на воздухе в течение 1–10 мин бумага приобретала характерный зеленовато-желтый цвет. Изменение окраски объясняется окислением адсорбированного на влажной бумаге сероводорода в процессе охлаждения кислородом воздуха:



Пересчет дисперсного состава пыли, полученного счетным методом, на соотношение фракций по массе частиц проводился в предположении сферической формы частиц. Плотность частиц принималась по данным работы [12] равной 2,5 т/м³.

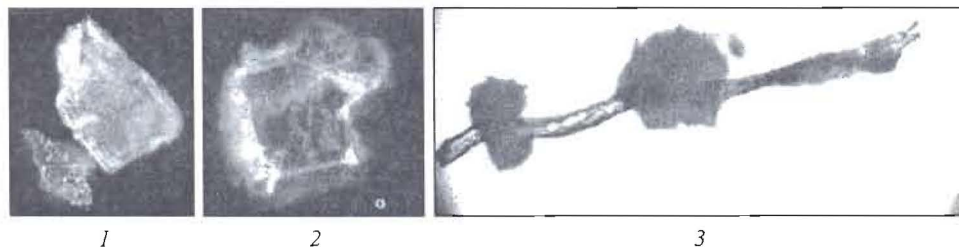


Рис. 6. Образцы пылевых частиц, уловленных на фильтровальной бумаге.
1, 2 — кристаллы серы пластинчатой формы, 3 — кристаллы карбоната натрия на стеклянном волокне.

Методика определения эффективности пылеулавливания на наклонных трубах газоочистного конденсатора

Стандартный метод улавливания пыли в жидкие поглотители и определение ее количества по соледержанию полученного раствора дает завышенные результаты, поскольку компоненты солей попадают в поглотитель не только за счет улавливания пыли, но и с каплями щелока и с газообразными компонентами.

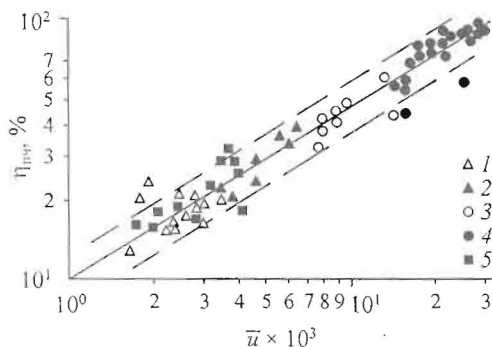
Известно, что в лабораторной практике для нахождения величины, не устанавливаемой прямыми методами, используются приемы косвенного определения с применением «метки». В случае выбросов из бака-растворителя плава в качестве метки, определяющей количество пыли в выбросах, приняты частицы нерастворимого остатка. По нашему мнению, наиболее корректно принять в качестве «этало-на» относительного содержания нерастворимых частиц в отложениях на стенках и крышке бака плава величину, составляющую 2,6 %.

Отбор проб пылевого уноса проводился в поглотители Рихтера, заполненные водой, в двух точках вытяжной трубы, до и после конденсатора. Одновременно с отбором пыли определялись скорость и объем парогазовых выбросов [13, 14]. Количество нерастворимого остатка определялось по методике, изложенной в работе [11].

Из результатов исследований можно заключить, что эффективность пылеулавливания зависит в основном от скорости парогазовой смеси и толщины пленки конденсата на стенке трубы конденсатора и определяется двумя основными механизмами: инерционным осаждением и осаждением за счет поперечного потока парогазовой смеси к поверхности трубы при конденсации. Эти механизмы позволяют уловить пыль в большом диапазоне размеров частиц: чем крупнее частицы пыли, тем легче они осаждаются за счет сил инерции, и в обратном случае — подхватываются поперечным потоком пара, направленным к стенке трубы. Поскольку поверхность труб покрыта пленкой конденсата, рассматриваем процесс пылеулавливания в предположении, что осаждается любая частица, соприкоснувшаяся с поверхностью пленки на стенке трубы.

Согласно нашим наблюдениям, частицы с диаметром $d \geq d_{кр}$ будут улавливаться только за счет инерционного механизма, а частицы с диаметром $d < d_{кр}$ — за счет поперечного потока, который возникает при конденсации пара. Разделение частиц на «крупные» и «мелкие» по дисперсному составу принималось по критическому диаметру частиц ($d_{кр}^{част}$) и определялось по $Stk_{кр}$. Согласно работе [14], величина критического значения критерия Стокса при обтекании круглого цилиндра составляет $Stk_{кр} = 1/8$.

На рис. 7 приведены результаты пылеулавливания, выполненные на разных предприятиях с помощью конденсатора, установленного перед вытяжной трубой. Здесь $\bar{u} = q/r\rho''U_{ПГ}$ — поперечная компонента скорости пара, q — удельный теп-



ловой поток, Вт/м², r — скрытая теплота парообразования, Дж/кг, ρ'' — плотность пара, кг/м³, $U_{ПГ}$ — скорость

Рис. 7. Степень улавливания частиц пленкой конденсата в зависимости от безразмерного значения потока вещества.

СРК-350 (Байкальский ЦБК): $t_{вх} = 10$ (1), 18 (2), 22 (3) °С; СРК-700 (Братский ЛПК): $t_{вх} = 25$ (4) °С; СРК-700 (Сегежский ЦБК): $t_{вх} = 10$ (5) °С.

парогазового потока в межтрубном пространстве. Трубы конденсатора охлаждались водой, имеющей различную температуру на входе. При охлаждении более теплой водой плотность теплового потока по высоте труб конденсатора убывала плавно и все трубы конденсатора были покрыты пленкой жидкости. При температуре воды $t_{\text{вх}} = 25^\circ\text{C}$ все трубы пакета по его высоте оказываются смоченными пленкой конденсата, что и приводит к значительно более полному пылеулавливанию. Можно отметить, что рост поперечного потока вещества при конденсации играет определяющую роль, т. к. данные, полученные в разных условиях, обобщались удовлетворительно. Нетрудно видеть, что скорость парогазового потока в экспериментах на Братском ЛПК в межтрубном пространстве конденсатора была заметно ниже, чем на Байкальском ЦБК. Значение оптимальной скорости парогазового потока, исключающей унос пленки в поток, рекомендовано на основании экспериментов, описанных в работе [7]. Очистка пылепарогазовых выбросов в конденсаторах соответствует санитарным нормам и осуществляется без дополнительных химикатов и энергозатрат.

Список литературы

1. Липовков И.З. Содорегенерационные котлоагрегаты. М.: Лесная промышленность, 1968. 82 с.
2. Бойков Л.М. Исследование процессов взаимодействия воды с плавом сульфата щелока как возможной причины топочных взрывов: Автореф. дисс. канд. техн. наук, Л. 1971. 16 с.
3. Корчунов Ю.Н., Фролов Б.Ф. Исследование взрывного процесса при взаимодействии солей натрия с водой как одной из причин разрушительных аварий в топке СРК. Исследование и разработка элементов энергетического оборудования // Тр. ЦКТИ. 1976. Вып. 18. С. 10–17.
4. Лендзель П., Морван Ш. Химия и технология целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесная промышленность, 1989. 544 с.
5. Пат. № 2043444 Российская Федерация, МПК D21C11/06. Устройство для регенерации тепла из парогазовых выбросов растворителя плава содорегенерационного котлоагрегата / Романова Л.В., Стасюк Е.А., Родионов В.Г., Гогонин И.И.; заявитель и патентообладатель СПб технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности. № 5056154/12; заявл. 29.07.1992; опубл. 10.09.1995.
6. Пат. № 2190714R4 Российская Федерация, МПК D21C11/06. Устройство для регенерации тепла и химикатов из парогазовых выбросов растворителя плава содорегенерационного агрегата сульфат-целлюлозного производства / Романова Л.В., Суслов В.А., Якимов И.В., Гогонин И.И.; заявитель и патентообладатель СПб гос. Технологический университет растительных полимеров. № 2001128052/12, заявл. 17.10.2001; опубл. 10.10.2002.
7. Романова Л.В., Гогонин И.И. Очистка парогазовых выбросов с помощью конденсатора // Теплоэнергетика. 1997. № 7. С. 57–61.
8. Леончик Б.И., Малкин В.П. Измерение в дисперсных потоках. М.: Энергия, 1971. 248 с.
9. Ярыгин И.В. Газокапельные потоки из осесимметричных каналов в вакуум: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2005. 15 с.
10. ПНДФ 14.1.2.110–97. Методика выполнения измерений содержания взвешенных веществ и общего содержания примесей в пробах природных и очищенных сточных вод гравиметрическим методом. М. 1997.
11. Романова Л.В., Братцева А.В. Улавливание пыли из парогазовых выбросов щелочной пленкой // Испарение, конденсация // Двухфазные течения: тр. IV Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: МЭИ, 2006. Т. 5. С. 172–175.
12. Романова Л.В., Братцева А.В. Оптимизация метода для конденсационной очистки парогазовой смеси // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 10. С. 52–54.
13. Технологический регламент для проектирования очистки газопылевых выбросов из бака растворителя плава содорегенерационного котлоагрегата. Л.: ЛТИ ЦБП, 1982. 120 с.
14. Леончик Б.И., Маякин В.П. Измерения в дисперсных потоках. М.: Энергия, 1971. 248 с.

Статья поступила в редакцию 8 июля 2011 г.