

В.И. Волков, С.М. Кисляк

Моделирование аэродинамики топочных устройств с развитой внутритопочной циркуляцией частиц

Внедрение циркулирующего и форсированного кипящего [1] слоя в промышленную энергетику наталкивается на определенные трудности, связанные с технологическими проблемами, такими как износ поверхностей, улавливание частиц и возврат их в топку. Для решения этих проблем необходимо иметь более точные данные об аэродинамике таких топков и распределении в них частиц. Одним из методов исследований в этой области является изотермическое моделирование. Основным требованием по условиям моделирования является сохранение критерия Рейнольдса и модифицированного критерия Фруда [2]. При этом взаимосвязаны оказываются такие параметры модели и объекта, как характерный размер, температура потока, его скорость, а также размер и плотность частиц. При этом определенные требования накладываются на геометрические размеры модели. Кроме того, чем ближе размеры модели и объекта, тем выше точность моделирования. Поэтому моделирование лучше проводить на крупномасштабных установках, а отдельные моменты выяснять на небольших моделях, конструкцию которых изменить проще.

Согласно указанным требованиям в экспериментальной лаборатории объединения «Бийскэнергомаш» была изготовлена модель топки (рис. 1), состоящая из разгонного участка 1 сечением $0,3 \times 0,5$ м, длиной 2 м, имеющего внизу газораспределительную решетку 2, и расширенного участка 3 сечением $0,8 \times 0,5$ м, высотой 3 м, которые соединялись диффузором 4 с наклоном стенок 50° . Установка имела один внутренний контур циркуляции частиц на расширении и два внешних: через лабиринтный золоуловитель (ЛЗУ) 5 и два спаренных циклона 6 типа ЦН-15 диаметром 0,5 м, в которых улавливались наиболее мелкие частицы. В качестве материала слоя использовалась смесь, состоящая из инертного наполнителя и золы с медианным диаметром $\delta=65$ мкм либо кварцевого песка с $\delta=200$ мкм. Запыленность потока в установке контролировалась по расходной массовой концентрации, определяемой по расходу частиц: А (кг/с) — через ЛЗУ, В (кг/с) — через циклоны, С

(кг/с) — на расширении модели, и рассчитывалась по формулам: $\mu=(A+B+C)/G$, кг/кг (для разгонного участка), $\mu=(A+B)/G$, кг/кг (в широкой части), где G — расход воздуха через установку, кг/с.

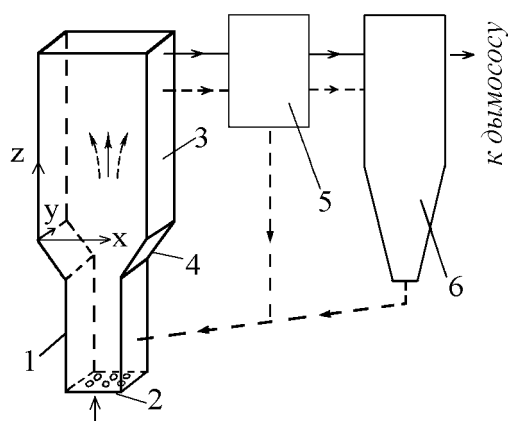


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Скорость газового потока определялась пневмометрическим способом как наиболее помехоустойчивым и надежным по сравнению с термоанемометрическим, бесконтактным оптическим и др. Для повышения точности измерений пневмосигнал от трубки Прандтля преобразовывался в электрический сигнал с помощью дифманометра колокольного типа [3], при изготовлении которого были приняты специальные меры по повышению его чувствительности и помехоустойчивости по сравнению с образцами промышленного изготовления. Тарировка такой измерительной системы проверялась прямым вращением пневмотрубки с постоянной скоростью. Погрешность измерения скорости пневмотрубкой при этом составила 0,2 м/с. Распределение частиц в потоке изучалось двумя способами: изокинетическим отбором проб [4] и с помощью пьезодатчика [5], позволяющего определять счетную концентрацию частиц по частоте соударений их с активной поверхностью пьезоэлемента.

По результатам исследований общая эффективность сепарации песка и золы линейно увеличивалась с ростом запыленности потока и его скорости ($v < 10$ м/с), а поведение фракционной эффективности золы имело

более сложный характер (рис. 2а). При скорости в узком сечении $v < 8,4$ м/с эффективность сепарации росла с увеличением диаметра частиц, а при $v \geq 8,4$ м/с падала для самых крупных. Этот факт можно объяснить, анализируя распределение плотности частиц золы по размерам. Как видно из рисунка 2б, крупные частицы имели пониженную плотность и легче уносились потоком, чем частицы с меньшим размером, но большей плотностью. Это также подтверждается и тем, что положения максимумов плотности частиц и эффективности их сепарации совпали для размера частиц 0,25 мм. Очевидно, что величина скорости, при которой должно наблюдаться ухудшение сепарации частиц, определяется их скоростью витания. При увеличении расходной концентрации частиц максимум эффективности сепарации смещался в область более крупных частиц ($\delta \approx 0,5$ мм), по-видимому, за счет торможения их мелкими в более запыленном потоке. При уменьшении скорости v до 7,2 м/с максимума эффективности не наблюдалось (рис. 2б), так как крупные пористые частицы не уносились потоком, а полностью сепарировались.

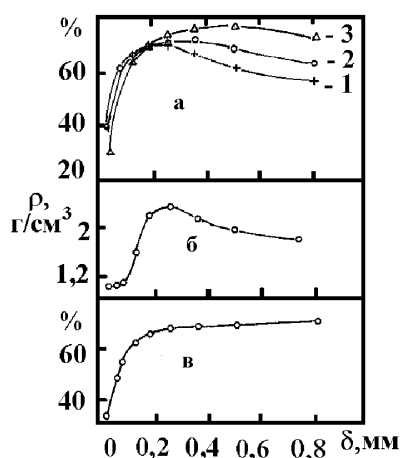


Рис. 2. Зависимость эффективности сепарации золы η и ее плотности ρ от размера частиц:
 а – при скорости $v=8,4$ м/с (1– $\mu=0,5$ кг/кг, 2– $\mu=1,0$ кг/кг, 3– $\mu=1,5$ кг/кг);
 в – при скорости $v=7,2$ м/с, $\mu=0,7$ кг/кг;
 б – плотность частиц

Часто в экспериментах изменение режимов работы установки требует добавления в нее крупного материала размером 3–15 мм, например, для изучения взаимодействия крупных и мелких фракций слоя [6]. Экспериментально было установлено, что измельчению подвержены в основном частицы крупнее 1 мм. Процентное содержание крупных фракций шлака новокузнецкого

угля в сепарирующемся материале уменьшалось и стабилизировалось через 10 мин для частиц размером 15 мм и примерно через 18 мин для частиц размером 7,5 и 3,7 мм (рис. 3). Это обстоятельство необходимо учитывать при планировании экспериментов с кипящим слоем.

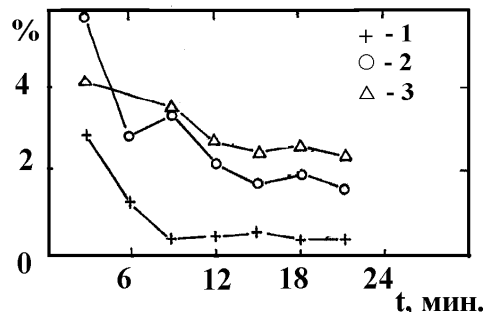


Рис. 3. Зависимость процентного содержания крупных частиц в сепарирующемся материале от времени при $v=8$ м/с: 1– $\delta=15$ мм, 2– $\delta=7,5$ мм, 3– $\delta=3,7$ мм

При исследовании аэродинамики в расширенном участке модели в незапыленном потоке струя, прошедшая диффузор, прилипла к одной из стенок, что является следствием эффекта Коанда, проявление которого хорошо известно в аэрофонтанных топках [7]. Ввод циркулирующих частиц с расходной массовой концентрацией 0,3 кг/кг в установку практически не повлиял на распределение воздушного потока. Струя по-прежнему отклонялась к стенке канала (рис. 4). К этой же стенке смещалось также максимальное значение концентрации частиц в потоке. На выходе из диффузора профили концентраций, измеренные пробоотборным методом и пьезодатчиком, были близкими. Максимум концентрации частиц был сдвинут относительно максимума скорости потока ближе к оси канала, что можно объяснить инерционностью частиц. Различие профилей концентраций вверху установки можно объяснить расслоением потока частиц по фракциям. Это подтвердил дисперсный анализ проб, который проводился ситовым методом [8]. Он показал, что крупные частицы отбрасываются к стенкам канала и образуют опускные потоки, а мелкие концентрируются по оси струи и выносятся, в отличие от аэрофонтанных топок, в которых к стенкам отбрасывается также много мелких частиц.

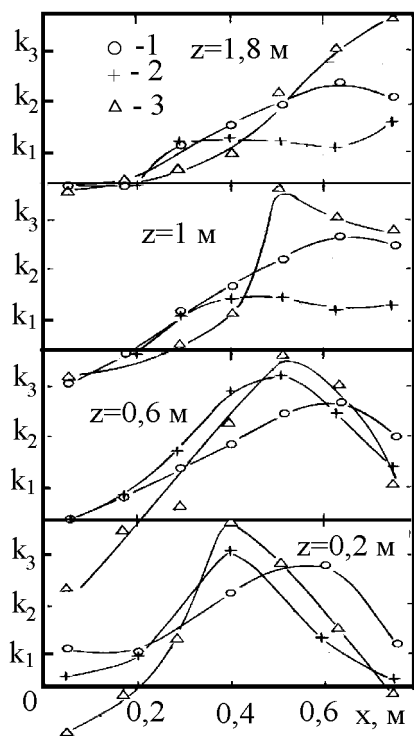


Рис. 4. Распределение скорости газового потока и концентрации частиц

1—скорость газа; 2—расходная массовая концентрация; 3—счетная концентрация.

Увеличение расходной концентрации циркулирующих частиц до 0,5 кг/кг привело к выравниванию профиля скорости воздушного потока, который при расходной концентрации 2 кг/кг был практически симметричным (рис. 5).

Проведенные исследования отражают довольно сложную аэродинамику топок с развитой внутритопочной сепарацией частиц, обусловленную широким фракционным составом частиц золы и необходимостью обеспечения их постоянной циркуляции через объем топки.

Литература

1. Рыжаков А.В. Исследование гидродинамических и фазовых процессов в установках с кипящим слоем // Электрические станции. 1996. ц 8.
2. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М., 1990.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. Л., 1989.
4. Трёмбля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок. М., 1977.
5. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. М., 1989.
6. Кисляк С.М., Соколов Ю.В. Холодное моделирование топок с ЦКС // Исследование и конструирование паровых котлов: Межвуз. научн.-техн. сб. Томск, 1993.
7. Алексеенко С.В., Срывков С.В. и др. Изотермическое моделирование аэродинамики фонтанно-вихревой топки // Электрические станции. 1992. ц 11.
8. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л., 1987.

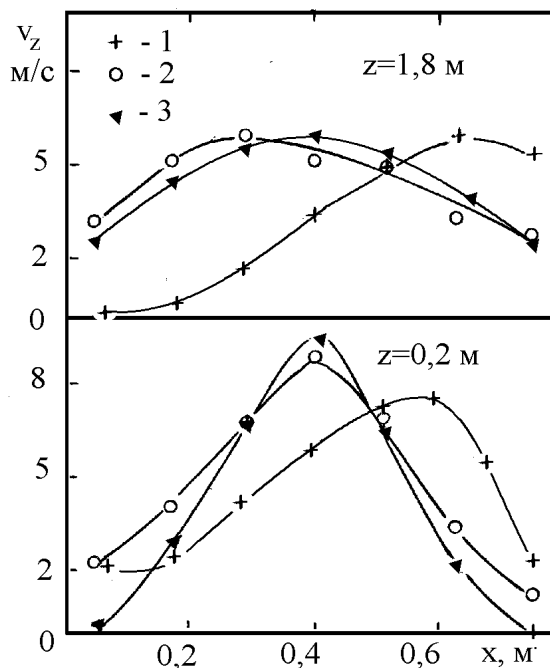


Рис. 5. Профиль скорости на разных высотах: 1— $\mu=0,3$ кг/кг; 2— $\mu=0,5$ кг/кг; 3— $\mu=2,0$ кг/кг

Аэродинамический эффект Коанда, проявляющий себя в пылеугольных и аэрофонтанных топках, может возникать и в топках с плотным и форсированным слоем при небольшой концентрации частиц в надслоевом объеме. При больших уровнях запыленности потока, особенно для циркулирующего кипящего слоя, данного эффекта можно не опасаться. Разработанные и примененные в настоящем исследовании устройства для регистрации скорости потока и счетной концентрации частиц могут применяться также для исследования топочных устройств в натурных условиях до 800°C.