

Топливо и энергетика

УДК 532.529:533.6.082.5

**Быстрый А.И., Квицинский В.А., Крывошеев С.И.,
Макарчук В.Н., Топал А.И., Хилько И.Н.**

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев

Определение параметров частиц в кипящем слое оптическим зондом

Создана экспериментальная установка для исследования свойств газодисперсных потоков типа кипящего слоя и кипящего слоя с возвратом. Создан оригинальный двухканальный оптический зонд для определения параметров частиц дисперсной фазы в потоке воздуха: их локальной скорости (средней и ее дисперсии) и относительной концентрации. Разработана, математически обоснована и экспериментально проверена на известных моделях методика определения перечисленных выше параметров частиц. Определены поля скоростей и концентраций частиц в нескольких сечениях колонны кипящего слоя в широком диапазоне изменения расхода воздуха — от начала кипения слоя до его турбулентного состояния.

Ключевые слова: газодисперсный поток, кипящий слой, турбулентность, концентрация частиц, скорость частиц.

Створено експериментальну установку для дослідження властивостей газодисперсних потоків типу киплячого шару та киплячого шару з поверненням. Створено оригінальний двоканальний оптичний зонд для визначення параметрів частинок дисперсної фази у потоці повітря: їх локальної швидкості (середньої та її дисперсії) та відносної концентрації. Розроблено, математично обґрунтовано та експериментально перевірено на відомих моделях методику визначення перерахованих вище параметрів частинок. Визначено поля швидкостей та концентрацій частинок у декількох перерізах колони киплячого шару у широкому діапазоні зміни витрати повітря — від початку кипіння шару до його турбулентного стану.

Ключові слова: газодисперсний потік, киплячий шар, турбулентність, концентрація частинок, швидкість частинок.

Разработка новых экологически чистых технологий сжигания и газификации угля в циркулирующем кипящем слое — актуальная задача развития энергетики. Ее решение сопряжено с изучением сложных взаимосвязанных тепломассообменных и аэродинамических процессов, протекающих в пределах одного реактора. В то же время получение детальной информации об аэродинамике дисперсных высокотемпературных потоков, образующихся в топочной

камере, в значительной мере осложнено трудностями технического характера. В связи с этим исследование структуры таких потоков на холдных аэродинамических стендах представляет собой самостоятельную научную задачу. В рамках таких исследований становится возможным детальное изучение аэродинамических полей (распределений концентраций твердых частиц) и по высоте установки, и вдоль радиуса (на разных высотах), а также в пристеночной

области. В дальнейшем полученные результаты могут быть использованы при определении коэффициентов теплоотдачи в топочной камере, перепадов давлений и пр., а также для расчетов элементов установок [1].

1. Установка для исследования аэродинамики движения частиц в кипящем слое

Работа выполнена на созданной установке для исследования аэродинамики движения частиц в кипящем слое (КС) с возвратом, которая изображена на рис.1. Установка состоит из вертикальной колонны КС (внутренний диаметр 92 мм, высота 3655 мм) для организации движения вверх газодисперсного потока, циклона для удаления частиц из потока и сброса избытка воздуха через сетку, тракта возврата частиц в КС, а также компрессора и трубопровода подачи воздуха в установку (на рисунке не показаны).

Компрессор (с асинхронным двигателем мощностью 5,5 кВт) задавал расход первичного воздуха для создания КС. Он запитывался от частотного преобразователя (фирма ETM Moeller, тип AWB 8230-1603), что позволяло регулировать расход воздуха частотой вращения ротора двигателя в диапазоне 0–50 Гц.

Трубопровод подачи воздуха в установку собран из пластиковых труб с внутренним диаметром 100 мм и общей длиной 12 м. В месте присоединения трубопровода к компрессору установлен шибер для регуляции его проход-

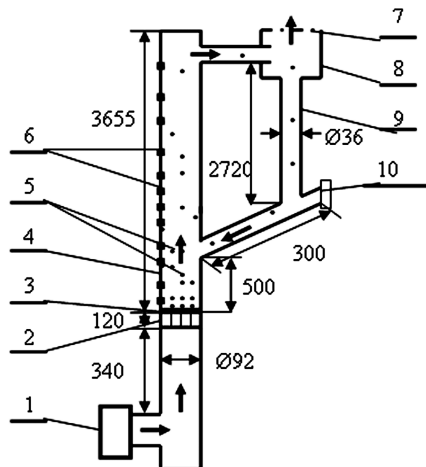


Рис.1. Схема установки для исследования аэродинамики движения частиц в КС: 1 – место присоединения трубопровода первичного воздуха; 2 – кассета из трубок; 3 – сетка КС; 4 – колонна КС; 5 – частицы; 6 – отверстия для оптического зонда; 7 – сетка циклона; 8 – циклон; 9 – тракт возврата частиц в КС; 10 – место подвода вторичного воздуха. Стрелки указывают направление движения воздуха. Числовые данные приведенные в миллиметрах.

ного пересечения. Локальное изменение сечения трубопровода шибером позволяло регулировать общее аэродинамическое сопротивление системы и частично сглаживать пульсации давления в колонне КС. Перед колонной трубопровод изменял направление движения воздуха из горизонтального на вертикальное с возобновлением ламинарности движения потока на прямолинейном участке после поворота, длина которого приблизительно в 5 раз превышала диаметр трубы. Объемы трубопровода и колонны разделены сеткой, что позволяло пропускать снизу вверх воздушный поток и не пропускать сверху вниз частицы, циркулирующие в слое. Размер отверстий сетки КС, разделяющей объемы, позволял создавать режим работы КС для частиц с диаметром более 0,8 мм.

Ниже сетки КС внутри трубопровода размещалась кассета из 387 трубок с внутренним диаметром 3 мм и длиной 120 мм для создания максимально равномерного распределения скорости воздуха по пересечению трубы КС.

Вертикальная колонна КС собрана из прозрачных труб (органическое стекло). Вдоль всей длины колонны в ее стенке были сделаны отверстия для оптического зонда. По мере роста скорости воздуха, поступающего в КС, высота подъема частиц в трубе увеличивалась до тех пор, пока они не начинали попадать в циклон. В циклоне воздух и частицы разделялись: воздух выходил наружу вверх через сетку, а частицы двигались вниз, падая по тракту возврата и попадая обратно в КС. После достижения подобного состояния организовывалась система КС с возвратом. В случае, если перепад давления между слоем и циклоном не позволял частицам возвращаться в колонну КС, включался дополнительный компрессор вторичного воздуха, который помогал частицам попасть обратно в слой.

Расход первичного воздуха определялся по температуре нагретого нихромового провода, который конвективно охлаждался воздушным потоком в трубопроводе. Температура провода измерялась хромель-алюмелевой термопарой. Показания термопары были прокалиброваны стандартным расходомером (SPD 241201, фирма KOBOLD) при соблюдении всех требований к стандартам измерений.

2. Методика измерения концентрации и скорости частиц в КС оптическим зондом

Исследование полей скоростей и концентраций частиц в КС проводилось оптическим зондом оригинальной конструкции (рис.2). Выбор оптического метода регистрации движения

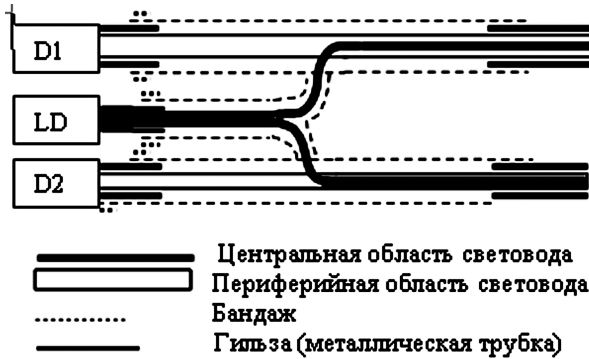


Рис.2. Конструкция оптического зонда: LD — полупроводниковый лазер; D1, D2 — фотодиоды.

частиц обусловлен тем, что он обеспечивает бесконтактную, непрерывную и безынерционную регистрацию интенсивности отраженного частицами излучения лазера.

Принцип работы зонда при определении концентрации и локальной скорости частиц в потоке заключается в следующем. Двухлучевой зонд размещается в потоке частиц. Частицы при движении пересекают световой пучок, который излучается центральной частью световода каждого зонда. Отраженное частицами назад лазерное излучение попадает на периферийную часть световода и по нему поступает на вход двух фотоприемников двух каналов зонда. Преобразованные в напряжение сигналы $X(t)$ и $Y(t)$, пропорциональные интенсивности отраженного излучения в каждом канале, переводятся в цифровую форму 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем и обрабатываются ПЭВМ по заданному алгоритму.

2.1. Методика определения концентрации частиц

Алгоритм математической обработки сигналов основан на том, что интенсивность отраженного от потока частиц излучения $X(t)$ является суммой случайного числа случайных слагаемых:

$$\tilde{O}(t) = \sum_{i=0}^{N_x(t)} x_i(t), \quad (1)$$

где t — текущий момент времени; $N_x(t)$ — число частиц в поле зрения канала зонда в момент времени t ; $x_i(t)$ — интенсивность отраженного излучения в момент времени t от i -й частицы.

Аналогичный вид имеет и сигнал по второму каналу:

$$Y(t) = \sum_{i=0}^{N_y(t)} y_i(t).$$

Переменные $x_i(t)$, $y_i(t)$ и $N_x(t)$, $N_y(t)$ — случайные величины со своими функциями распределения, однако вследствие подобия зондов можно считать, что функции распределения величин $x_i(t)$, $y_i(t)$, как и $N_x(t)$, $N_y(t)$, одинаковы, и в дальнейшем рассматривать обобщенный сигнал вида (1).

Для сигнала (1) известны выражения его моментных функций первого и второго порядка (среднего значения $\langle X \rangle$ и дисперсии D_X суммы случайных величин) через средние значения и дисперсии слагаемых [2, 3]:

$$\langle X \rangle = \langle N \rangle \langle x \rangle; \quad (2)$$

$$D_X = \langle N \rangle D_x + \langle x \rangle^2 D_N, \quad (3)$$

где знак $\langle \rangle$ — среднее значение случайной величины.

Формулы (2), (3) справедливы при любых законах распределения случайных величин $x_i(t)$ и $N_x(t)$. В частном случае пуассоновского потока, когда частицы двигаются полностью независимо, $D_N = \langle N \rangle$, и формула (3) значительно упрощается:

$$D_X = \langle N \rangle \langle x^2 \rangle. \quad (4)$$

Выражения (2)–(4) являются математическим обоснованием всех известных способов определения относительной концентрации частиц в потоке, поскольку моментные функции сигнала $\langle X \rangle$ и D_X , непосредственно измеряемые в эксперименте, прямо пропорциональны искомой величине $\langle N \rangle$ — средней концентрации частиц в объеме регистрации (ОР), откуда собирается отраженное частицами излучение.

2.2. Методика определения скорости частиц

Для измерения локальной скорости частиц необходимо измерить взаимно корреляционную функцию (ВКФ) сигналов $X(t)$ и $Y(t)$, которая позволяет определить время задержки распространения возмущения между двумя точками в пространстве [4].

Отраженное от частиц излучение (при их движении со скоростью u) регистрируется сначала в первом канале (сигнал $X(t)$), потом, с задержкой, во втором (сигнал $Y(t)$). Если поместить сигнал от отдельной частицы в первом канале $x_i(t)$, то во втором канале сигнал имеет вид

$$y_i(t) = \alpha x_i(t - d/u) = \alpha x(t - \tau),$$

где d — расстояние между зондами; параметр α отображает возможное отличие в коэффициентах усиления сигналов в каналах.

Для одной частицы формы сигналов одинаковы, поскольку одинаковы системы освещения и регистрации отраженного излучения. Это экспериментально подтверждается подобием нормированных на дисперсии автокорреляционных функций (АКФ) сигналов в обоих каналах (нормировка убирает зависимость результата от α).

Вышесказанное справедливо для одиночной частицы с определенной скоростью. Если имеется распределение частиц по величине скорости (в направлении регистрации), то существует функция распределения времени запаздывания $f(\tau')$ (ФРВЗ) сигналов. В этом случае сигнал во втором канале можно представить в виде

$$Y(t) = \int_{\tau'_{\min}}^{\tau'_{\max}} \alpha X(t - \tau') f(\tau') d\tau'.$$

Интегрирование проводится по всему диапазону возможного времени запаздывания (τ'_{\min} , τ'_{\max}) с учетом условия нормировки:

$$\int_{\tau'_{\min}}^{\tau'_{\max}} f(\tau') d\tau' = 1.$$

В ситуации, когда сигнал в первом канале задержан относительно второго, реализуются отрицательные времена запаздывания.

ВКФ сигналов между каналами есть интеграл свертки [2]:

$$\begin{aligned} R_{XY}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} X(t) Y(t + \tau) dt = \\ &= \int_{\tau'_{\min}}^{\tau'_{\max}} \alpha R_{XX}(t - \tau') f(\tau') d\tau', \end{aligned}$$

или для нормированной на дисперсии ВКФ:

$$\begin{aligned} g_{XY}(\tau) &= R_{XY}(\tau) / (D_X D_Y)^{1/2} = \\ &= \int_{\tau'_{\min}}^{\tau'_{\max}} g_{XX}(t - \tau') f(\tau') d\tau'. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения ФРВЗ по измеренной ВКФ $g_{XY}(\tau)$ необходимо решить интегральное уравнение вида (5). Далее функцию распределения частиц по скоростям (ФРЧС) $\varphi(u)$ можно найти, воспользовавшись соотношением $\varphi(u) du = f(\tau') d\tau'$.

Решить интегральное уравнение (5) можно, только имея математическое описание АКФ сигнала $g_{XX}(\tau)$, то есть после калибровки зонда частицами. Такая калибровка для определения формы импульса излучения, отраженного частицами при их пересечении лазерного луча, осуществлялась объектами с известными формами и размерами: 1) дробь — шарики диаметром 1,5 мм; 2) мак — полуэллипсоиды 1,3×1×0,8 мм; 3) пшено — шарики диаметром 2,1–2,5 мм; 4) медный провод диаметром 0,5 мм.

Частицы пересекали ОР, откуда отраженное ими излучение попадало на световоды зонда, в свободном падении поодиночно или сплошным потоком. Провод крепился к диску вращения так, чтобы пересекать объемы регистрации обоих световодов зонда на определенном фиксированном расстоянии от них.

Анализ экспериментальных данных показал, что АКФ сигнала отраженного частицами излучения с высокой точностью описывается функцией Гаусса:

$$\begin{aligned} g_{XX}(\tau) &= \exp(-u^2 \tau^2 / 2w^2) = \\ &= \exp(-\tau^2 / 2\tau_x^2), \end{aligned}$$

где w — пространственный масштаб спада интенсивности излучения лазера [5], $\tau_x = w / u$.

Известно [2], что с ядром в виде функции Гаусса уравнения вида (5) не имеют аналитического решения. Поэтому было сделано предположение, основанное на результатах численного моделирования поведения частиц в колонне КС [6], что ФРЧС имеет вид функции Гаусса:

$$\varphi(u) \sim \exp[-(u - \langle u \rangle)^2 / 2\sigma_u^2],$$

где $\langle u \rangle$ — средняя скорость движения частиц; σ_u^2 — дисперсия распределения скоростей.

В этом случае ВКФ приобретает такой вид:

$$g_{XY}(\tau) = C \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - d / \langle u \rangle)^2}{2(\tau_x^2 + \sigma_u^2 \tau^2 / \langle u \rangle^2)}\right), \quad (7)$$

где C — постоянная.

2.3. Программное обеспечение измерений

Для математической обработки результатов измерений параметров сигналов АЦП было создано специализированное программное обеспечение, которое позволяло вычислять моментные функции первого и второго порядка двух

каналов АЦП по стандартной процедуре [1] и подбирать математическую модель для результатов числовой обработки сигналов.

Подбор математической модели происходил посредством процедуры минимизации для расчета искомых величин параметров модели. Сама процедура заключается в нахождении таких значений параметров, при которых целевая функция

$$F = \sum_{i=1}^N (FT_i - FE_i)^2,$$

равная сумме квадратов расхождений между экспериментальными FE_i и теоретическими FT_i значениями, имеет минимум. Применение метода наименьших квадратов опирается на развитый набор алгоритмов поиска параметров [7]. В наших исследованиях использовался алгоритм поиска, известный как симплекс-метод.

3. Экспериментальные результаты

Кипящий слой создавался частицами мака и пшена (плотность 1000 и 1300 кг/м³). Объект исследований был выбран с учетом того, что на этой стадии целью работы являлась отработка методики измерений параметров двухфазного потока, а мягкие округлые частицы дисперсной фазы не могли повредить оптический зонд. Загрузка твердой фазы составляла для мака 0,6–1,5 кг, для пшена – 1,3 кг.

Типичный характер движения частиц в колонне КС для этих псевдооживленных материалов (класса А) детально описан в литературе [1]: «В цилиндрических аппаратах с ростом скорости газа возникает режим псевдооживления, получивший в зарубежной литературе название «турбулентный». В этом режиме газовая фаза становится непрерывной, пакеты твердых частиц непрерывно разрушаются и возникают вновь. Неоднородности напоминают по форме языки пламени, движутся зигзагообразно. В турбулентном режиме достигается наилучший контакт газа и твердых частиц».

3.1. Измерение концентрации частиц

Относительная концентрация частиц определялась по дисперсии сигнала в одном канале оптического зонда, поскольку корреляция дисперсий сигналов в каналах была более 0,9 (при больших значениях дисперсии наблюдались такие же большие значения корреляции дисперсий сигналов и их средних значений). Результаты измерений концентрации частиц мака в зависимости от высоты h над сеткой КС приведены на

рис.3 для разных загрузок мака P и скоростей воздуха u_g .

Анализ результатов показывает следующее:

1) при любой загрузке с ростом скорости воздуха (после превышения некоторого порога) на каждом уровне по высоте колонны КС наблюдается быстрый, иногда экспоненциальный, рост концентрации частиц. При дальнейшем росте скорости концентрация стабилизируется, а затем медленно спадает к некоторому постоянному значению (масса частиц распределяется по колонне и тракту возврата);

2) при увеличении загрузки мака (от 0,6 до 0,9 кг и выше) концентрация частиц на высоте 1035 мм может превысить концентрацию на высоте 335 мм, поскольку значительная доля час-

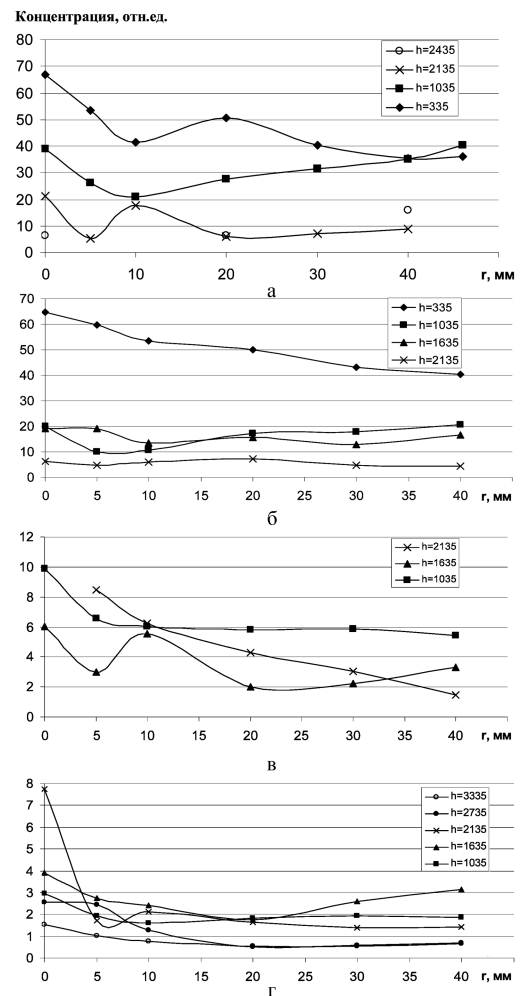


Рис.3. Зависимость концентрации частиц мака от расстояния до стенки на разных высотах h (мм) над сеткой КС при разных загрузках P (кг) и скоростях газа u_g , м/с: а – 2,69 ($P = 0,6$); б – 2,55 ($P = 0,9$); в – 2,27 ($P = 1,2$); г – 2,38 ($P = 1,5$).

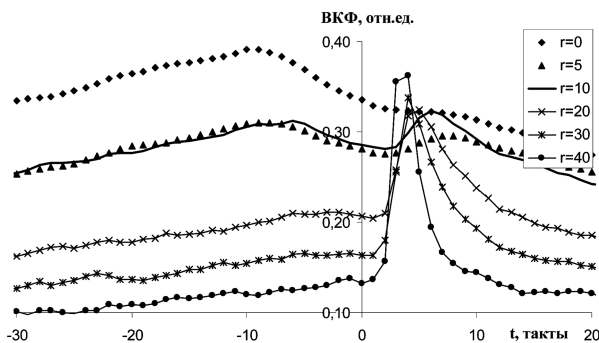


Рис.4. Вид ВКФ сигналов излучения, отраженного от частиц, на разных расстояниях от стенки r (мм).

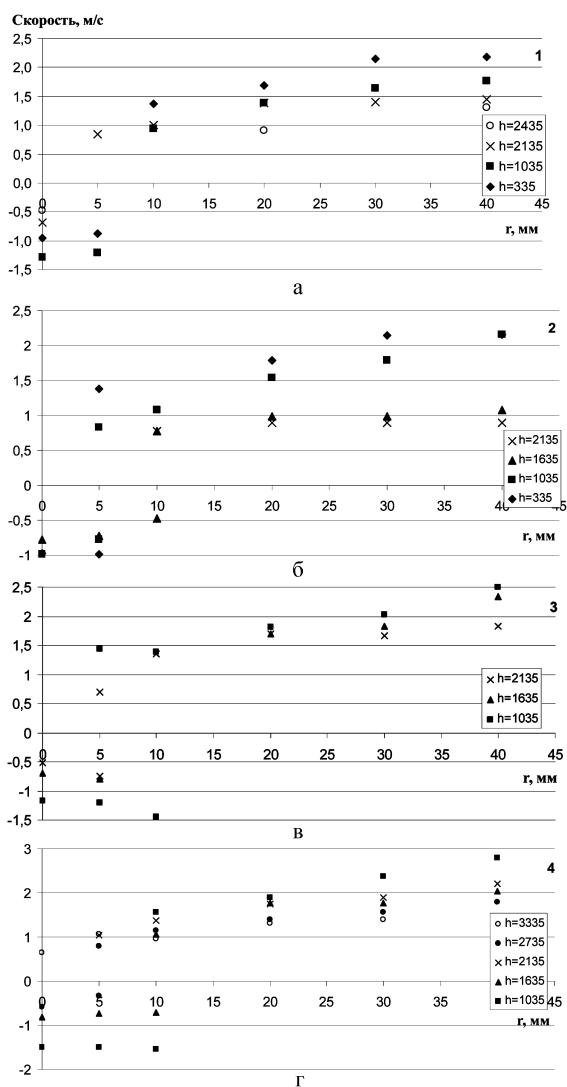


Рис.5. Зависимость скорости частиц от расстояния до стенки на разных высотах h (мм) от сетки КС при различных загрузках P (кг) и скоростях газа u_g , м/с: а – 2,69 ($P = 0,6$); б – 2,55 ($P = 0,9$); в – 2,27 ($P = 1,2$); г – 2,38 ($P = 1,5$).

тиц начинает циркулировать в режиме ЦКС и попадать в колонну на высоте 500 мм через тракт возврата;

3) распределение концентрации частиц по радиусу колонны и высоте качественно согласуется с литературными данными [1, 8]. При малых нагрузках наблюдается стремительное падение концентрации частиц на оси колонны с высотой, что предусматривается теоретически.

3.2. Измерение скорости частиц

Средняя скорость частиц $\langle u \rangle$ и дисперсия гаусового распределения скоростей частиц σ_u^2 определялись из сопоставления модели (7) и экспериментальных ВКФ, типичный вид которых приведен на рис.4. Видно, что у стенки ($r = 0$) наблюдается движение плотного потока частиц вниз (отрицательное значение времени запаздывания). При перемещении зонда к центру колонны плотность потока снижается, движение частиц вниз прекращается (при $r = 10$ мм) и появляются частицы, которые двигаются вверх. На расстояниях 20–40 мм все частицы двигаются вверх. Их скорость при увеличении растет, а дисперсия скорости уменьшается (уменьшается ширина ВКФ).

Результаты измерений скорости частиц в зависимости от высоты h (мм) над сеткой КС приведены на рис.5 для разных загрузок мака P и скоростей воздуха u_g .

Анализ результатов показал, что распределение скорости частиц по радиусу колонны и высоте качественно согласуется с литературными данными [1, 8].

Выводы

Создана экспериментальная установка для исследования свойств газодисперсных потоков типа кипящего и циркулирующего кипящего слоя.

Разработан и создан двухканальный оптический зонд для определения параметров частиц дисперсной фазы в воздушном потоке: их локальной скорости (средней и ее дисперсии) и относительной концентрации.

Разработана, математически обоснована и экспериментально проверена на известных моделях методика определения перечисленных выше параметров частиц.

Определены поля скоростей и концентраций частиц дисперсной фазы в нескольких сечениях по высоте колонны КС в широком диапазоне изменения расхода воздуха – от начала кипения слоя до его турбулентного состояния. Результаты исследований сопоставлены с из-

вестными литературными данными и качественно с ними согласуются.

Список литературы

1. Расчеты аппаратов кипящего слоя : Справ. / Под ред. И.П.Мухленова, Б.С.Сажина, В.Ф.Фролова. — Л. : Химия, 1986. — 352 с.
2. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М. : Наука, 1970. — 720 с.
3. Ван-дер-Зил А. Шум (источники, описание, измерение) / Пер. с англ. под ред. А.К.Нарышкина. — М. : Сов. радио, 1973. — 228 с.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. — М. : Мир, 1983. — 312 с.
5. Москалев В.А. Теоретические основы оптико-физических исследований. — Л. : Машиностроение, 1987. — 318 с.
6. Zhou H., Flamant G., Gauthier D., Lu J. Numerical simulation of the turbulent gas-particle flow in a fluidized bed by an LES-DPM model // Trans IChemE. Part 1. Chemical Engineering Research and Design. — 2004. — Vol. 82 (A7). — P. 918–926.
7. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. — М. : Финансы и статистика, 1982. — 344 с.
8. Hartge E. U., Rensner D., Werther J. Solids concentration and velocity patterns in circulating fluidized beds // Circulating Fluidized Bed Technology. II. Proc. 2nd Intern. Conf. — Oxford : Pergamon, 1988. — P. 165–180.

Поступила в редакцию 07.07.12

***Bystry A.I., Kvitsinsky V.A., Krivosheev S.I.,
Makarchuk V.N., Topal A.I., Hilko I.N.***

The Institute of Coal Energy Technology of NASU, Kiev

The Determination of Particles Parameters in Fluidized Bed by Optical Probe

The experimental facility for properties investigation of gas-dispersed flows of fluidized bed type and fluidized bed with return type is designed. The original dual-channel optical probe for parameters of dispersed phase in air stream determination such as particles local velocity (average and variance) and relative concentration is constructed. The methodology for listed above particles parameters determination is developed, mathematically substantiated and experimentally tested. The velocity fields and particles concentrations in several sections of fluidized bed column in wide range of air volume discharge from the layer initial boiling point to its turbulent state are determined.

Key words: gas-dispersed flow, fluidized bed, turbulence, particles concentration, particles velocity.

Received July 7, 2012