УДК 532.529

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ЧАСТИЦ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

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

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев, Украина

АННОТАЦИЯ

Цель работы состояла в разработке оптической методики определения значений пространственно-временных полей скоростей и концентраций частиц в широком диапазоне условий существования кипящего слоя (КС). Описаны конструкция оптического зонда и методика определения параметров частиц. Приведены результаты применения разработанного метода для определения полей скоростей и концентраций частиц в КС с возвратом.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В КС

Схема установки для исследования аэродинамики движения частиц в КС с возвратом изображена на рисунке 1. Установка состоит из вертикальной трубы 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 двух компрессоров и трубопровода подачи первичного воздуха (на рисунке не изображены).

Первичный компрессор (с асинхронным двигателем мощностью 5,5 кВт) задает расход первичного воздуха для создания КС. Он питается от частотного преобразователя (фирма ETM Moeller, тип AWB 8230-1603), что позволяет легко регулировать расход воздуха частотой вращения ротора двигателя компрессора в диапазоне 0-50 Гц.

Трубопровод подачи воздуха в установку собран из пластиковых труб с внутренним диаметром 100 мм и имеет общую длину 12 м. В месте присоединения трубопровода к компрессору установлен шибер для регуляции его проходного пересечения. Локальное изменение сечения трубопровода шибером позволяет регулировать общее аэродинамическое сопротивление системы и частично сглаживать пульсации давления в трубе КС.

Объемы трубопровода и колонны разделены сеткой КС, что позволяет пропускать снизу вверх воздушный поток и не пропускать сверху вниз частицы, которые циркулируют в слое.

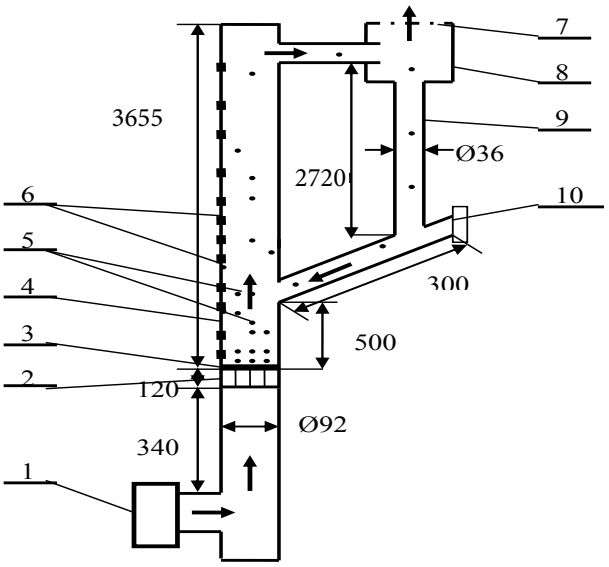


Рис.1 Схема установки для исследования аэродинамики движения частиц в КС. 1 – место присоединения трубопровода первичного воздуха, 2 – кассета из трубок, 3 – сетка КС, 4 – колонна КС, 5 – частицы, 6 – отверстия для оптического зонда, 7 – сетка циклона, 8 – циклон, 9 – тракт возврата частиц в КС, 10 –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

Размер отверстий сетки КС, разделяющей объемы, позволял создавать режим работы КС для частиц с диаметром, большим 0,8 мм.

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

Вертикальная колонна КС собрана из прозрачных труб (органическое стекло). Вдоль всей длины колонны в ее стенке были сделаны отверстия для крепления оптического зонда. По мере роста скорости воздуха, поступающего в КС, высота подъема частиц в трубе увеличивается до тех пор, пока они не начинают попадать в циклон. В циклоне воздух и частицы разделяются – воздух выходит наружу вверх через сетку, а частицы двигаются вниз, падая по тракту возврата и попадая обратно в КС. После достижения подобного состояния организуется система ЦКС. В случае, если перепад давления между слоем и циклоном не позволяет частицам возвращаться в трубу КС, включается дополнительный компрессор вторичного воздуха, который помогает частицам попасть обратно в слой.

Загрузка дисперсного материала для создания КС осуществлялась вручную через тракт возврата. Высота материала в спокойном состоянии без подачи воздуха измерялась линейкой, что позволяло контролировать массу и вес частиц в слое.

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

ОПТИЧЕСКИЙ ЗОНД. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ

Исследование полей скоростей и концентраций частиц в КС проводилось оптическим зондом оригинальной конструкции, который изображен на рисунке 2.

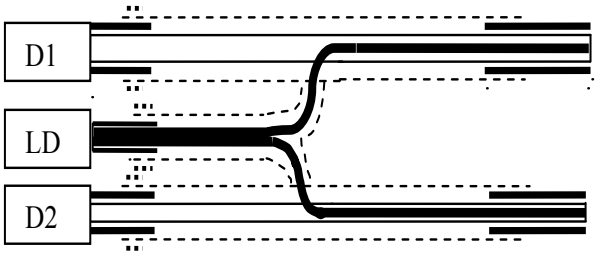


Рис.2 Конструкция оптического зонда.

LD – полупроводниковый лазер, D1,D2 – фотодиоды

Центральная область световода
Периферийная область световода
Бандаж
Гильза (металлическая трубка)

Выбор оптического метода регистрации движения 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 заключался в следующем. Двухлучевой зонд размещался в потоке частиц. Частицы при своем движении пересекали два лазерных луча, которые генерировались лазерным диодом (KLM-650-20, длина волны 650 нм, мощность 20 мВт) и излучались центральной частью световода каждого зонда. Отраженное частицами назад лазерное излучение попадало на периферийную часть световодов и по ним поступало на вход двух фотоприемников D1 и D2. Преобразованные в напряжение сигналы $X(t)$ и $Y(t)$, пропорциональные интенсивности отраженного излучения в каждом канале, переводились в цифровую форму 12-ти разрядным АЦП и обрабатывались ПЭВМ по заданному алгоритму.

Определение концентрации частиц

Алгоритм математической обработки сигналов основан на том, что интенсивность отраженного от потока частиц излучения является суммой случайного числа случайных слагаемых

$$X(t) = \sum_{i=0}^{N_x(t)} x_i(t) \qquad (1)$$

где t - текущий момент времени, $x_i(t)$ - интенсивность отраженного излучения в момент

времени t от i-ой частицы, $N_x(t)$ - число частиц в поле зрения канала X зонда. 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 (среднее значение и дисперсия суммы случайных величин) через среднее значение и дисперсию слагаемых [1,2]

$$\overline{X} = \overline{N} \cdot \overline{x} \qquad (2)$$

$$D_X = \overline{N} \cdot D_x + \overline{x}^2 \cdot D_N \qquad (3)$$

Следует подчеркнуть, что формулы (2), (3) справедливы при любых законах распределения случайных величин $x_i(t)$ и $N_x(t)$. В случае пуассоновского потока, когда частицы двигаются независимо, $D_N = \overline{N}$ и формула (3) значительно упрощается

$$D_X = \overline{N} \cdot x^2. \qquad (4)$$

Выражения (2) и (4) являются математическим обоснованием всех известных способов определения относительной концентрации частиц в потоке, поскольку моментные функции сигнала $\overline{X}$ и D_X, которые измеряются в эксперименте, прямо пропорциональны искомой величине $\overline{N}$ - средней концентрации частиц в объеме регистрации (ОР), откуда собирается отраженное частицами излучение.

Определение скорости частиц

Для определения локальной скорости частиц необходимо измерить взаимнокорреляционную функцию (ВКФ) сигналов $X(t)$ и $Y(t)$, которая позволяет определить время задержки распространения возмущения между двумя точками в пространстве [3].

Сигнал отраженного от частиц излучения при их движении со скоростью регистрируется сначала в первом канале (сигнал $X(t)$), потом – во втором (задержанный сигнал $Y(t)$). Если сигнал от отдельной частицы в первом канале $x_i(t)$, то во втором канале сигнал будет иметь вид $y_i(t) = \alpha x_i(t - d/u) = \alpha x_i(t - \tilde{\tau})$, где d - расстояние между зондами, параметр α отражает отличие коэффициентов усиления сигналов. Форма сигналов одинакова, поскольку одинаковы частицы, системы освещения и регистрации отраженного излучения. Этот факт экспериментально подтверждается подобием нормируемых на дисперсии (что убирает зависимость результата от α) автокорреляционных функций (АКФ) сигналов в обоих каналах.

Вышесказанное справедливо для одиночной частицы с одной определенной скоростью. Если имеется распределение частиц по скоростям, то существует и функция распределения времен запаздывания (ФРВЗ) $f(\tilde{\tau})$ сигналов. В этом случае сигнал во втором канале можно представить в виде

$$y(t) = \int_{\tilde{\tau}_{min}}^{\tilde{\tau}_{max}} \alpha x(t - \tilde{\tau}) f(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau}$$

Интегрирование проводиться по всему диапазону возможных времен запаздывания $(\tilde{\tau}_{min}, \tilde{\tau}_{max})$ с учетом условия нормировки $\int_{\tilde{\tau}_{min}}^{\tilde{\tau}_{max}} f(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau} = 1$. В ситуации, когда сигнал в первом канале задержан относительно второго, реализуются отрицательные времена запаздывания.

ВКФ сигналов между каналами есть интеграл свертки [3]

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) y(t + \tau) dt = \int_{\tilde{\tau}_{min}}^{\tilde{\tau}_{max}} \alpha R_{xx}(\tau - \tilde{\tau}) f(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau}$$

или, для нормированных КФ

$$g_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{D_x D_y}} = \int_{\tilde{\tau}_{min}}^{\tilde{\tau}_{max}} g_{xx}(\tau - \tilde{\tau}) f(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau}. \qquad (5)$$

Для нашего оптического зонда объем регистрации излучения имеет конечную ширину и для определения ФРВЗ необходимое решить интегральное равнение вида (5). Далее функцию распределения частиц по скоростям (ФРЧС) $\varphi(u)$ можно найти, воспользовавшись соотношением $\varphi(u)du = f(\tilde{\tau})d\tilde{\tau}$.

Решить интегральное равнение (5) можно только имея математическое описание АКФ сигнала, то есть после калибровки зонда частицами. Такая калибровка для определения формы импульса излучения, отраженного частицами при их пересечении лазерного луча, осуществлялась объектами с известной формой и размером

1) дробь – шарики диаметром 1,5 мм
2) мак – полуэллипсоиды 1,3x1x0,8 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

$$g_{ii}(\tau) = \exp(-u^2\tau^2/2w^2) = \exp(-\tau^2/2\tau_i^2), \quad (6)$$

где $i = x, y$, w - пространственный масштаб спадания интенсивности излучения лазера [5].

Известно [1], что с ядром в виде функции Гаусса уравнения вида (5) не имеют решения. Поэтому было сделано достаточно логичное предположение [6], что ФРЧС имеет вид функции Гаусса $\varphi(u) \approx \exp(-(u-\bar{u})^2/2\sigma_u^2)$,

где $\bar{u}$ - средняя скорость движения частиц, σ_u^2 - дисперсия распределения скоростей.

В этом случае ВКФ приобретает вид

$$g_{xy}(\tau) \approx C \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - d/\bar{u})^2}{2(\tau_l^2 + \sigma_u^2\tau^2/\bar{u}^2)}\right) \quad (7)$$

где C - постоянная, $\tau_l = w/\bar{u}$.

Программное обеспечение

Для математической обработки результатов измерений параметров сигналов АЦП было созданный 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 данного метода наименьших квадратов опирается на развитый набор алгоритмов поиска параметров [4]. В наших исследованиях использовался алгоритм поиска, известный как симплекс-метод.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Кипящий слой создавался частицами мака и пшена. Объект исследований было 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, пшена – 1,3 кг.

Типичный характер движения частиц в колонне КС для этих псевдоожиженных материалов (класса А) детально описан в литературе [7]. «В цилиндрических аппаратах с ростом скорости газа возникает режим псевдоожижения, 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».

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 такие же большие значения корреляции дисперсий сигналов и их средних значений).

Результаты измерений концентрации частиц приведены на рисунке 3 для разных загрузок мака и скоростей воздуха ug.

Анализ результатов показывает, что:

1) При любой загрузке при достижении определенного значения скорости воздуха на каждом уровне по высоте колонны КС наблюдается бурный, иногда экспоненциальный, рост концентрации частиц. При последующем росте скорости концентрация стабилизируется, а затем медленно спадает к некоторому постоянному значению, когда вся масса частиц распределяется по колонне и тракту возврата.

2) При увеличении загрузки (от 0,6 до 0,9 кг мака и выше) концентрация частиц на вы-

соте 1035 мм может превысить концентрацию на высоте 335 мм, поскольку значительная доля частиц начинает циркулировать в режиме ЦКС и попадать в колонну на высоте 500 мм через тракт возврата.

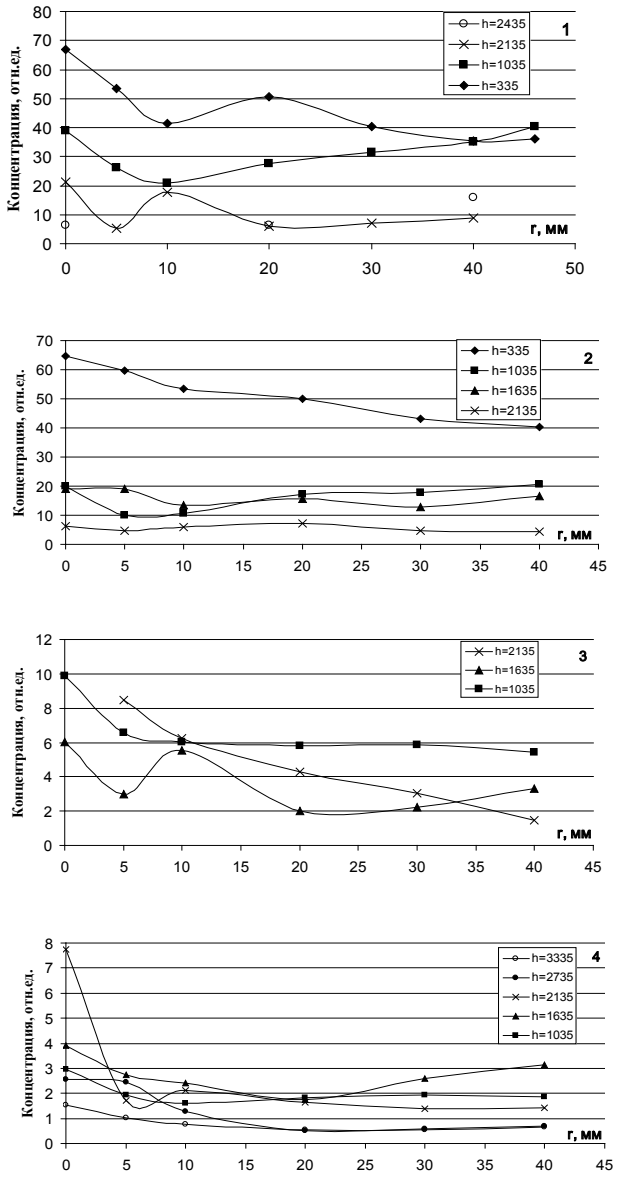


Рис.3 Зависимость концентрации частиц от расстояния до стенки при разных загрузках: 1 – 0,6 кг, ug.=2,69 м/с, 2 - 0,9 кг, ug. =2,55 м/с, 3 - 1,2 кг, ug.=2,27 м/с, 4 – 1,5 кг , ug. =2,38 м/с.

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

Измерение скорости частиц

Средняя скорость частиц и дисперсия гаусового распределения скоростей частиц σ_u^2 определялись из сопоставления модели (7) и экспериментальных ВКФ, типичный вид которых приведен на рисунке 4.

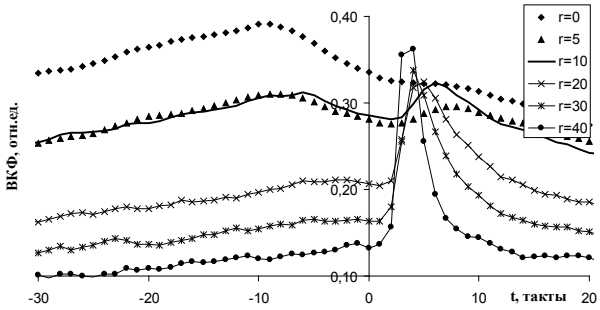
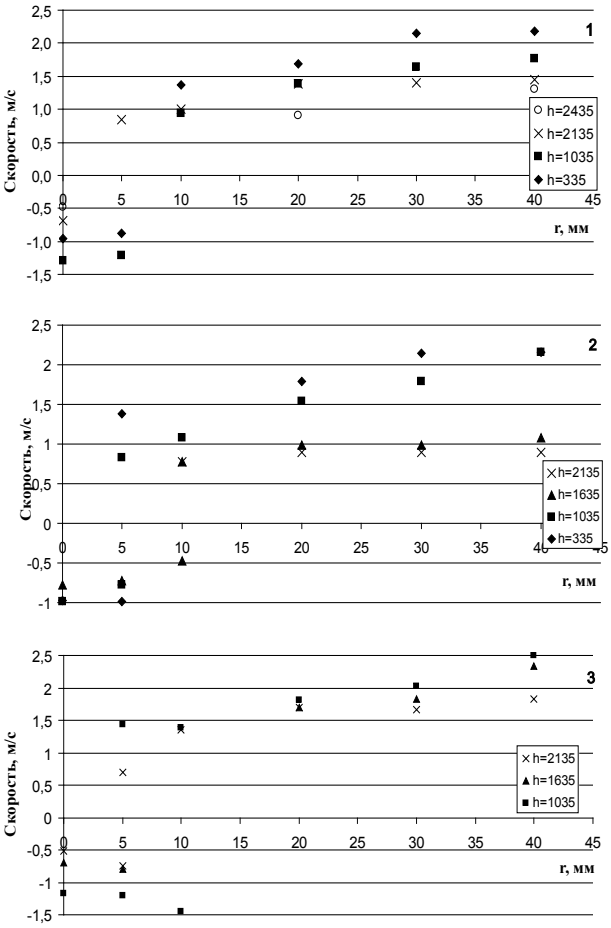


Рис.4 Вид ВКФ сигналов излучения, отраженного от частиц, на разных расстояниях от стенки.



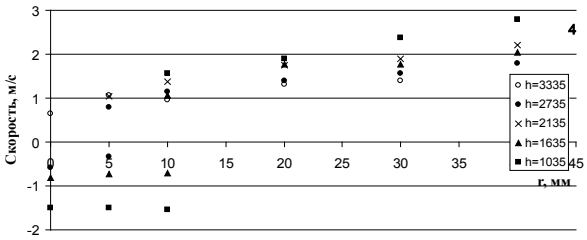


Рис.5 Зависимость скорости частиц от расстояния до стенки колонны КС при разных загрузках: 1 – 0,6 кг, ug =2,69 м/с, 2 - 0,9 кг, ug=2,55 м/с, 3 - 1,2 кг, ug=2,27 м/с, 4 – 1,5 кг ug=2,38 м/с.

Как видно из рисунка, 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 ($r = 10$), 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 приведены на рисунке 5 для разных загрузок мака и скоростей воздуха ug.

Анализ результатов показал, что распределение скорости частиц по радиусу колонны и высоте качественно согласуется с известными литературными данными [7,8].

ВЫВОДЫ

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

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

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

Определены поля скоростей и концентраций частиц дисперсной фазы в нескольких сечениях колонны КС в широком диапазоне изменения расхода воздуха – от начала кипения слоя до его турбулентного состояния. Результаты исследований сопоставлены с известными литературными данными и качественно с ними согласуются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
2. Ван-дер-Зил А. Шум (источники, описание, измерение). Пер. с англ. под ред. А. К. Нарышкина. – М.: Сов. радио, 1973. – 228 с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа: Пер. с англ. – М: Мир,1983. – 312 с.
4. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. – М.: “Финансы и статистика”, 1982. – 344 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. Расчеты аппаратов кипящего слоя. Справочник / Под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 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 Int. Conf. Oxford: Pergamon, 1988. – P. 165–180.