

ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ ТВЁРДЫХ ЧАСТИЦ

Э.П.Волчков, В.В. Лукашов, Р.Х. Абдрахманов

Федеральное государственное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Новосибирск, Россия

Применение центробежного псевдоожигенного слоя (ЦПС) зернистого материала существенно расширяет потенциал совершенствования различных технологических процессов. Одним из преимуществ ЦПС является возможность повышения интенсивности тепло- и массообмена, что обеспечивается высокой скоростью обтекания частиц газовым потоком. Известно несколько различных схем организации ЦПС, но наибольшей привлекательностью, по-видимому, обладают аппараты с неподвижными стенками из-за простоты конструкции, надёжности и относительной дешевизны.

В настоящее время опытных данных о параметрах закрученного двухфазного течения очень мало, основная масса работ посвящена исследованию устойчивости вращающегося зернистого слоя, расходных характеристик вихревых аппаратов и потерь давления [1-5, 8]. Известно, что поведение ЦПС зависит как от геометрии вихревой камеры, так и от свойств самого зернистого материала, и прежде всего от плотности и размеров частиц [5, 6]. Условия существования устойчивого слоя изучались в работе [7], в которой, был предложен критерий устойчивости ЦПС ($d\Gamma/dr = 0$, r - текущее значение радиуса, Γ -циркуляция газового потока), для вихревых камер с подачей закрученного потока газа через боковые поверхности. Имеется ряд работ [1, 5, 8], в которых проводились измерения скорости вращения ЦПС в вихревых камерах с цилиндрическим завихрителем, при различных расходах воздуха. В [1] были проведены измерения механическим датчиком – «флажком». Использование механических датчиков позволяет оценить движение слоя как единого целого, не позволяя получить характеристики движения частиц внутри слоя. Аналогичные результаты получены в [5], где измерения проводились с помощью скоростной видео- съёмки. В работе [8] данные о параметрах вращения слоя получены с использованием лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), в тех же условиях, что и в [1]. Но и эти данные дают нам представление только о скорости движения частиц на внешних поверхностях слоя.

Определение условий, при которых вращающийся псевдоожигенный слой частиц будет находиться в устойчивом состоянии до сих пор остается предметом исследований. Продвижение в этом направлении сдерживается ограниченностью имеющихся данных о динамических характеристиках вращающегося зернистого слоя.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию поля скорости частиц внутри самого слоя и воздушного потока в пространстве над ЦПС.

Исследования поля течения были проведены в цилиндрической вихревой камере с торцевым завихрителем, схематично показанной на рис.1. Завихритель был образован 36-ю щелями шириной 2 мм с углом наклона к горизонтальной поверхности 30°. Ширина кольцевого завихрителя (глубина щелей) по радиусу – $b = 6$ мм. Площадь проходного сечения завихрителя 432 мм². Диаметр камеры $2R_K = 100$ мм, высота – $H_K = 160$ мм. Для установки диаметра выхлопного отверстия ($d = 20 - 100$ мм) использовался набор съёмных диафрагм. Слой формировался из сферических частиц Al_2O_3 со средним диаметром 3.5 мм. Плотность частиц дисперсного материала - 1500 кг/м³.

Вид вращающихся частиц слоя создаёт впечатление, будто частицы в нём двигаются

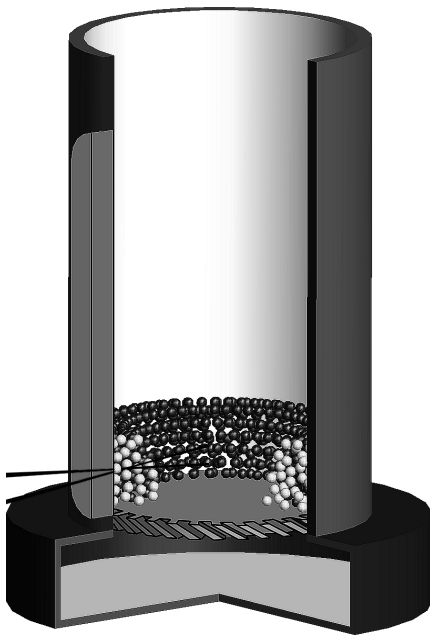


Рис.1. Схема экспериментальной вихревой камеры с центробежным псевдооживленным слоем твердых частиц

достаточно близко друг от друга, что возможно останавливало исследователей от использования точечных оптических методов. Но как выяснилось, использование ЛДА для измерения скорости движения частиц внутри слоя возможно. Более того, возможно это единственный метод, который позволяет получить данные о скорости движения частиц внутри слоя. В данной работе для измерений скорости движения частиц ЦПС применён двухкомпонентный ЛДА, работающий по схеме обратного рассеяния света. Для проведения измерений в боковой стенке вихревой камеры монтировались оптические окна. Измерялись распределения по радиусу окружной и осевой компоненты вектора скорости движения частиц ЦПС, в различных сечениях по высоте слоя, а так же распределения средних и пульсационных характеристик компонент вектора скорости газового потока над ЦПС. Кроме этого были проведены измерения скорости движения частиц ЦПС на его свободной поверхности методом PIV. В этом случае лазерный нож проецировался на внешнюю видимую поверхность ЦПС через выход из вихревой камеры. Лазер работал в импульсном режиме, делая 2 короткие вспышки, с временным интервалом 200 мкс, во время каждой вспышки, приёмная фотокамера делала снимок. В эксперименте производилось по 1000 пар снимков. Для идентификации перемещающихся крупных частиц слоя, они были окрашены в черный цвет и покрыты светоотражающими частицами диаметром 0.1-0.2 мм. Расчет

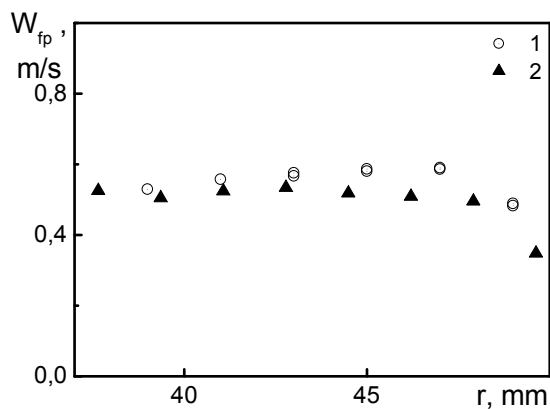


Рис.2. Скорость вращения частиц ЦПС на внешней границе. Масса частиц слоя 100 g. 1 — ЛДА, $G = 19.6 \text{ g/s}$, 2 — PIV, $G = 18.4 \text{ g/s}$.

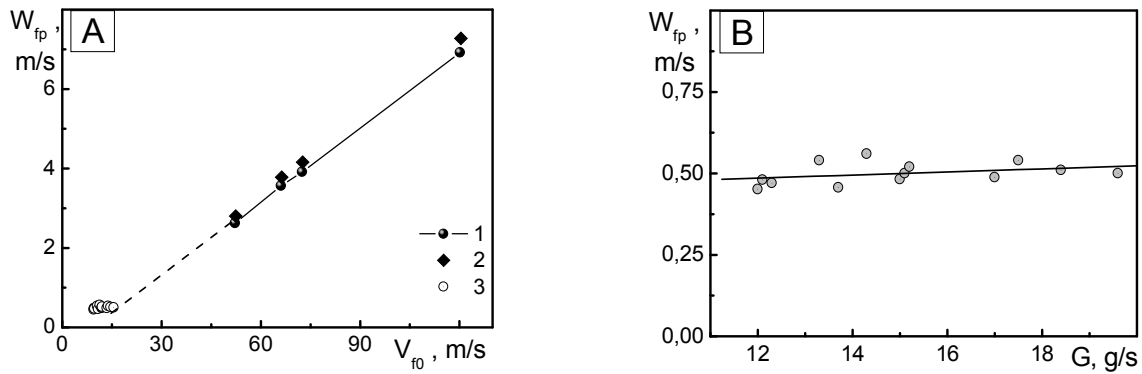


Рис.3. Скорость вращения слоя: А) в зависимости от скорости воздуха в щелях завихрителя (1, 2 — вихревая камера с цилиндрическим боковым завихрителем, пшеница, масса пшеницы 0.3 и 0.25 кг [10]. 3 — вихревая камера с торцевым завихрителем, Al₂O₃, масса 50 — 120 г.). В) в зависимости от массового расхода воздуха.

скорости по полученным снимкам осуществлялся с помощью пакета программ ActualFlow [9]. На рис. 2 представлены распределения окружной компоненты вектора скорости движения частиц ЦПС на его внешней границе полученные методом PIV. Там же показаны данные, полученные с помощью ЛДА внутри слоя частиц, в окрестности верхней границы слоя. Как видно, данные полученные разными методами практически совпадают между собой.

На рис. 3А приведены данные зависимости скорости вращения частиц ЦПС на его свободной границе от среднерасходной скорости в щелях завихрителя, полученные методом PIV. На рис. 3В показаны данные для камеры с торцевым завихрителем в большем масштабе. Начальная масса слоя частиц в экспериментах варьировалась от 50 до 120 грамм. Там же приведены данные [10], полученные механическим датчиком — «флажком». Видно, что характер зависимостей для двух типов вихревых камер различен. Если для вихревых камер с боковым завихрителем наблюдается линейная зависимость вращения слоя от скорости воздуха в щелях завихрителя, то в камере с торцевым завихрителем эта зависимость отсутствует.

На рис. 4 А и 4 В представлены радиальные распределения осевой U_{zp} и окружной W_{fp} компонент скорости движения частиц внутри слоя, на различных высотах при установке выходной диафрагмы $d = 20$ мм. Отметим, что на боковой стенке камеры скорости движения частиц имеют ненулевые значения.

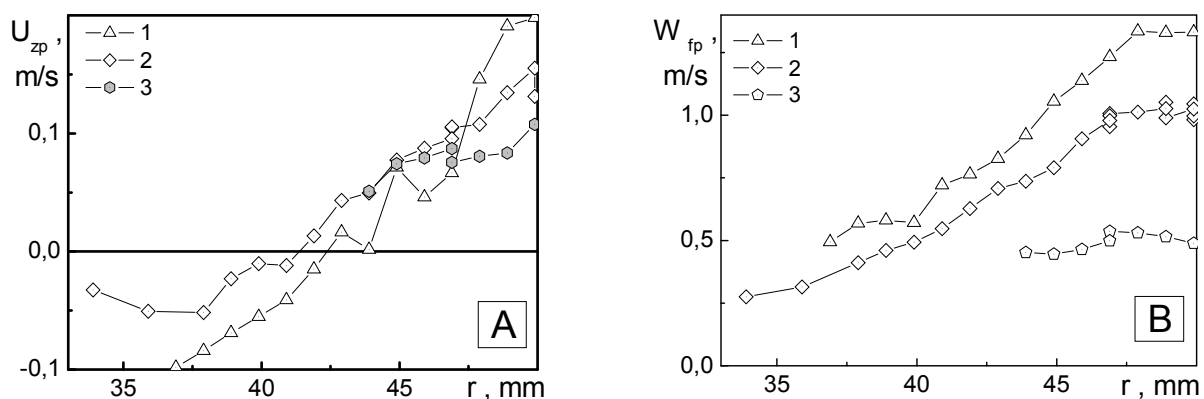


Рис.4. Распределения осевой (А) и окружной (В) компонент скорости движения частиц слоя. Цифрами обозначены расстояния от завихрителя: 1 — 10 мм, 2 — 15 мм, 3 — 29 мм.

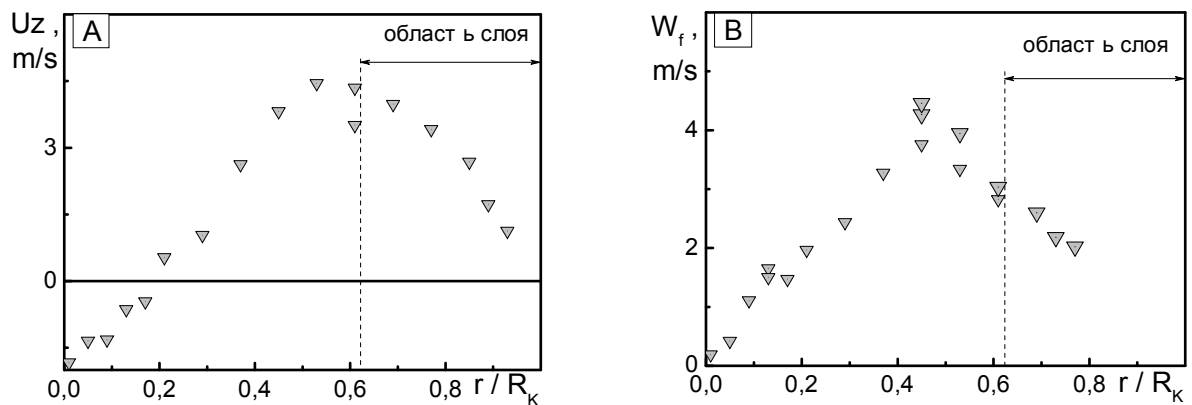


Рис.5. Распределения осевой (А) и окружной (В) компонент скорости воздушного потока.

Это связано с тем, что слой частиц скользит по цилиндрической поверхности вихревой камеры. Вблизи боковой поверхности, при $r > 43$ мм, частички движутся вверх $U_{zp} > 0$ (рис. 4А). При $r < 43$ мм частицы, напротив, движутся вниз $U_{zp} < 0$. Так как масса слоя во времени практически не изменяется, то в окрестности торцевого завихрителя частицы возвращаются обратно в слой. Скорость вращения частиц (рис. 4 В) на высоте 30 мм падает в 3 - 4 раза. Как видно из представленных данных, траектории движения частиц имеют винтовой характер. По видимому, существенное снижение скорости вращения по высоте слоя является ещё одной причиной, объясняющей слабую зависимость скорости вращения слоя от расхода воздуха (рис. 3 В). Заметим, что как показали проведённые опыты, изменение диаметра выходной диафрагмы практически никак не сказывается на поведении слоя.

На рисунках 5А и 5 В приведены распределения скорости газового потока по радиусу вихревой камеры в условиях, соответствующих данным, показанным на рис.4. Измерения были выполнены с помощью ЛДА над слоем частиц, на относительной высоте вихревой камеры $h/H_K = 0.66$. Значения окружной компоненты скорости при прохождении через слой снижаются со значения 42 м/с на выходе из щелей завихрителя до значений меньших 3...4 м/с.

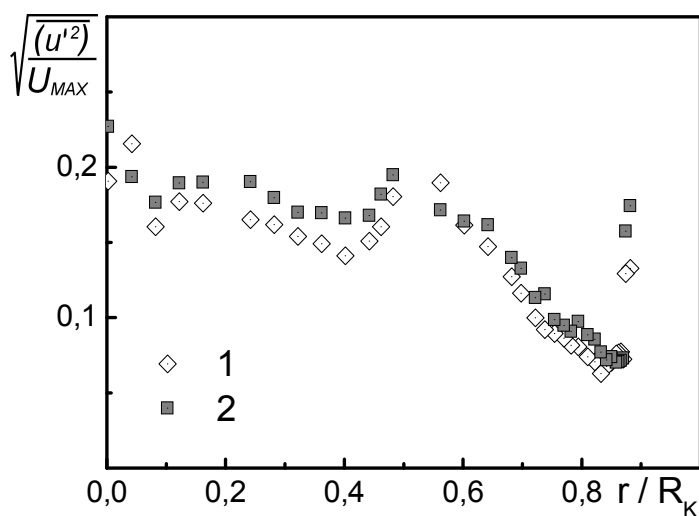


Рис.6. Распределение интенсивности пульсаций аксиальной (1) и окружной (2) компонент скорости потока воздуха над вращающимся слоем частиц. $h/H_K = 0.66$.

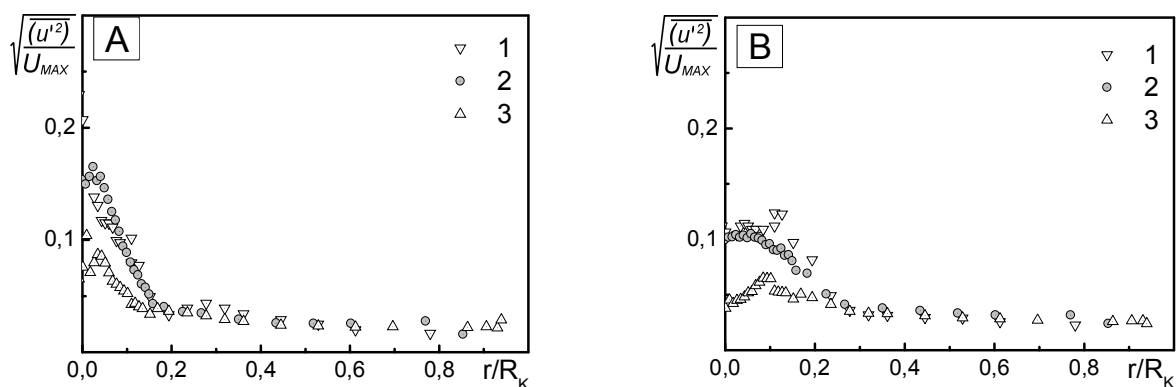


Рис.7. Распределение интенсивности пульсаций аксиальной (А) и окружной (В) компонент скорости потока воздуха в однофазном закрученном потоке. Цифрами обозначены безразмерные высоты h/H_k , относительно завихрителя, на которых были произведены измерения: 1 — 0.3, 2 — 0.5, 3 — 0.8.

На рисунке 6 показано распределение интенсивности пульсаций окружной и аксиальной компонент скорости, отнесённых к максимальным значениям соответствующих компонент средних скоростей. Распределения средних скоростей, соответствующих условиям на рисунке 6, приведены на рисунке 5. Данные получены при диаметре выходной диафрагмы $d = 20$ мм. Массовый расход воздуха составлял 21 г/с. Масса зернистого материала 140 г. Для сравнения на рисунке 7 приведены данные о турбулентности в случае однофазного потока в такой же обработке. Видно, что вращение слоя в камере с торцевым завихрителем приводит к значительному повышению уровня интенсивности пульсаций скорости в основном объёме камеры. При $r/R_k > 0.6$, что соответствует «следу» вращающегося слоя, интенсивность пульсаций в вихревой камере минимальная. Распределения интенсивности пульсаций для обеих компонент скорости практически совпадают между собой по всему измеренному сечению.

Степень турбулентности, построенная с использованием локальных средних значений окружной и осевой компонент, показана на рисунке 8. Здесь $Tu = \sqrt{(u'_z)^2 + (w'_\phi)^2} / \sqrt{U_z^2 + W_\phi^2}$.

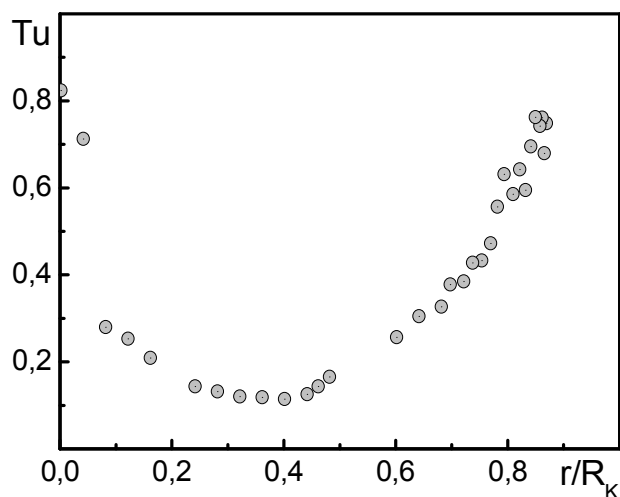


Рис.8. Распределение степень турбулентности потока воздуха.

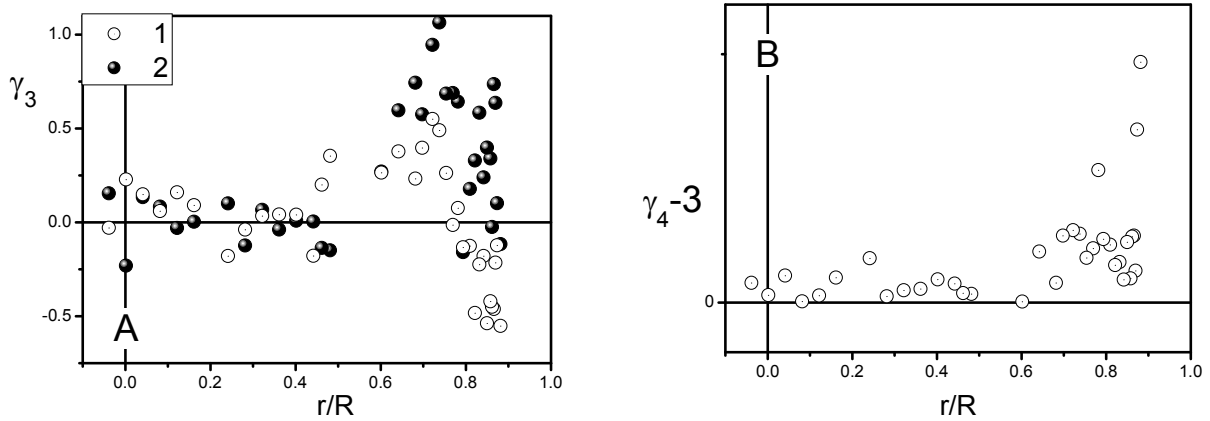


Рис.9. Распределение коэффициента асимметрии (А) и коэффициента эксцесса (В) в вихревой камере с торцевым завихрителем при вращении слоя зернистого материала. 1- окружная; 2- осевая компонента.

В таком представлении выделяется область течения $r/R_K \sim 0.5$ с минимальным уровнем турбулентности. На больших удалениях от оси течения $d\Gamma/dr < 0$, вращение не приводит к подавлению пульсаций и уровень турбулентности начинает расти. Разделение течения в основном объёме камеры на две области прослеживается и в распределениях третьих и четвёртых моментов, показанных на рисунке 9. В области положительного градиента циркуляции коэффициенты асимметрии и эксцесса близки к нулевым значениям. Что свидетельствует о том, что функция плотности вероятности пульсаций скорости близка к Гауссовой. В зоне отрицательного градиента циркуляции γ_3 имеет максимум, а при $r/R_K=0.8\dots 0.9$ меняет знак

В ходе проведения эксперимента было замечено, что при увеличении температуры подаваемого воздуха для раскручивания и удержания стабильно вращающегося слоя зернистого материала необходимо снизить массовый расход воздуха. Наличие слоя вращающегося оценивалось визуально как состояние, когда все частицы пришли во вращательное движение. Для объяснения этого наблюдения было сделано предположение, что величина ρU^2 , необходимая для раскрутки слоя массой m при изменении температуры

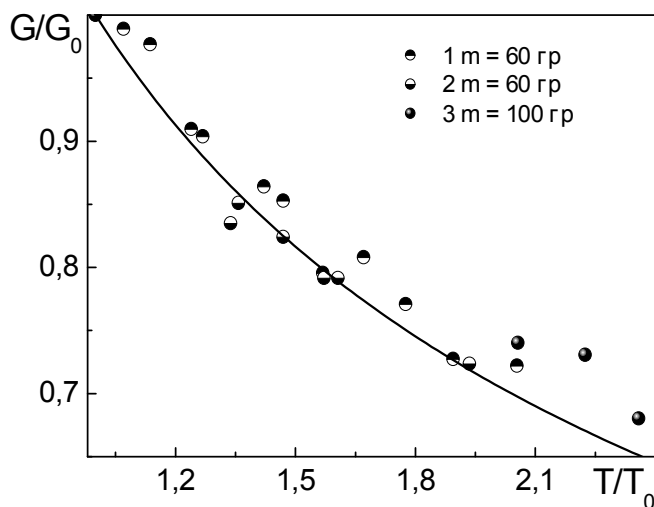


Рис. 10 - Влияние неизотермичности на расход подаваемого газа.

остаётся постоянной. В этом случае, в приближении идеального газа, должна выполняться зависимость:

$$G = G_0 \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad (1)$$

где G - массовый расход воздуха при температуре T , G_0 – массовый расход воздуха при температуре T_0 .

Как видно из данных, представленных на рисунке 10, такое предположение вполне удовлетворительно подтверждается экспериментально, опытные точки обобщаются зависимостью (1), обозначенной на графике сплошной линией.

Заключение:

Течение в вихревой камере с торцевым завихрителем при наличии вращающегося слоя частиц обладает рядом особенностей, не проявляющихся в других типах камер. Эксперименты показали, что в этой конфигурации происходит наиболее значительное снижение момента количества движения. Изменяется характер распределений окружной и осевой компонент средней скорости. Так в радиальном профиле циркуляции появляется максимум при $r/R_K \approx 0.4$.

В отличие от центробежного слоя, формирующегося в вихревой камере с боковым цилиндрическим завихрителем, в рассмотренных конфигурациях скорость вращения частиц изменяется по высоте слоя почти в три раза. Траектории движения частиц имеют винтовой характер. По-видимому, в таких условиях взаимодействие частиц между собой может стать не менее значимым фактором, чем трением слоя о стенки камеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-4349.2010.8.

Литература

1. Волчков Э.П., Дворников Н.А., Ядыкин А.Н. Особенности тепло – массообмена в псевдооживленном слое частиц в вихревой камере// Труды IV Минского международного форума.- 2000.- т.6.- С.115-124.
2. Волчков Э.П., Кайданик А.Н., Терехов В.И., Ядыкин А.Н. Аэродинамика и теплообмен в вихревой камере с центробежным псевдооживленным слоем частиц// Теоретические основы химических технологий.- 1993.- т.27, №3.- С.258-263.
3. Бородуля В.А., Подберёзский А.И., Журавский Г.И. Массообмен в центробежном псевдооживленном слое // Тепло- и массоперенос: от теории к практике.- Минск.- 1984.
4. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984- 320С.
5. De Wilde J., De Broqueville A. Experimental study of fluidization of 1G-Geldart D-type particles in a rotating fluidized bed with rotating chimney// AIChE J.-2008.- 54, N8.- pp.2029-2044.
6. Смульский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука.- 1992.- 301 С.
7. Гольдштик М.А. Вихревые потоки.-Новосибирск: Наука.-1981.-366 с.
8. Дворников Н.А., Белоусов П.П. Исследование псевдооживленного слоя в вихревой камере// ПМТФ.- 2011.- т.52.- N 2(306).- С. 59-65.
9. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н. (2006) Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow). Вычислительные методы и программирование, том 7, стр. 79-85.
10. Волчков Э.П., Дворников Н.А., Ядыкин А.Н. Моделирование сушки и удержания зерна в вихревых камерах протоком воздуха через слой зерна// Промышленная теплотехника.- 1999.- т.21, N2-3.- с. 72-78