

УДК 532.529

Динамика двухфазного закрученного потока в вихревой камере с нижним торцевым завихрителем*

Р.Х. Абдрахманов¹, Н.А. Дворников¹, В.В. Лукашов^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
Новосибирск

E-mail: luka@itp.nsc.ru

С помощью PIV (Particle Image Velocimetry) и лазерного доплеровского анемометра измерены компоненты тангенциальной и аксиальной скорости газа и частиц в вихревой камере с псевдооживленным слоем частиц, выполнены качественные оценки динамики слоя частиц и численное моделирование течения в вихревой камере с центробежным псевдооживленным кипящим слоем твердых частиц. Показано, что с ростом скорости газа в щелях завихрителя скорость вращения слоя растет практически линейно, с увеличением массы слоя скорость вращения падает. Путем численного расчета получены данные о распределениях объемной доли частиц и скорости течения газа внутри слоя.

Ключевые слова: вихревая камера, центробежный кипящий слой, скорость двухфазного потока.

Введение

Одним из перспективных путей развития тепломассообменных аппаратов может стать разработка устройств с центробежным псевдооживленным слоем частиц в вихревой камере. Высокая скорость обтекания частиц закрученным газовым потоком обеспечивает интенсивную тепломассоотдачу и равномерность обработки зернистого материала. Первые подходы к осуществлению этого процесса, по-видимому, были предприняты в Германии Э. Хейтманом в 1940. Для воздействия центробежных сил на дисперсные материалы использовалось вращение корпуса вихревой камеры. В 1950-х годах на основе анализа гидродинамики и устойчивости вращающегося слоя частиц в потоке воздуха было проведено теоретическое и экспериментальное исследование аппаратов с центробежно-зажатым слоем частиц [1]. Здесь же, в частности, исследовалось горение угля. Установлено [2], что в аппарате с вращающимися стенками может быть реализовано три режима: режим плотной упаковки зернистого материала, полного псевдооживления и промежуточный режим. Масштабы размеров частиц зернистого материала в центробежном псевдооживленном слое включают и нанопорошки [3].

Исследования динамики газа и слоя частиц в вихревых камерах с неподвижными стенками с завихрителем на боковой поверхности вихревой камеры демонстрируют большое разнообразие типов течения газа, режимов вращения и псевдооживления слоя

* Работа выполнена при поддержке РНФ (проект No. 16-19-10325).

частиц [4–9]. Однако во всех случаях скорость вращения псевдооживленного слоя частиц в несколько раз меньше скорости вращения газа, выходящего из слоя. При этом скорость вращения слоя практически линейно растет со скоростью газа в щелях завихрителя.

Большой цикл работ по исследованию ограниченных закрученных двухфазных потоков выполнен в работах [6, 8, 10–12], посвященных, в том числе, изучению устойчивости центробежного псевдооживленного слоя. Как отмечалось в работе [11] в вихревой камере с неподвижными стенками большое значение имеет трение частиц о внутренние поверхности аппарата.

Отметим, что для формирования центробежного слоя частиц могут быть применены различные схемы организации закрутки потока. Одним из популярных решений на сегодняшний день является способ организации псевдооживленного слоя с использованием торцевого закручивающего аппарата. Геометрические и расходные параметры представленных в литературе подобных систем варьируются в широких пределах. Применяется как псевдооживление в поле центробежных сил [13], так и использование завихрителя для создания равномерного псевдооживления в поле силы тяжести [14]. В экспериментах [14] в зависимости от расхода воздуха наблюдались различные режимы течения: режим фильтрации через неподвижный слой частиц, частично псевдооживленный (переходный) режим, режим с полностью псевдооживленным слоем частиц с частичным вращением и режим с развитым центробежным псевдооживленным слоем.

Данных о характеристиках закрученного двухфазного течения крайне мало. Можно отметить полученные с помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) результаты исследования [5] скорости вращения внешней границы вращающегося слоя зерна. В работах [15, 16] применение скоростной видеосъемки и системы панорамной анемометрии по изображениям частиц (PIV) позволило получить данные для разных типов

зернистого материала в зависимости скорости вращения от расходных параметров. При этом в указанных исследованиях речь идет о скорости вращения слоя частиц на внешних визуально наблюдаемых поверхностях слоя.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования и расчеты динамики слоя частиц и газового потока в вихревой цилиндрической камере с нижним торцевым завихрителем при отсутствии верхнего торца камеры.

Методика исследований

Измерения проводились в вихревой камере, схематично изображенной на рис. 1. Диаметр и высота камеры составляли $2R_k = 100$ мм и $H = 160$ мм. Завихритель, показанный отдельно в поле рис. 1, представлял собой диск, в торце которого фрезерованием были выполнены 36 наклонных щелей. Ширина щели составляла 2 мм, глубина $b = 6$ мм. Угол наклона образующей щели к торцевой поверхности составлял 30 градусов. Через щели закручивающего устройства воздух при комнатной температуре подавался в слой зернистого материала, приводя его во вращение. В качестве

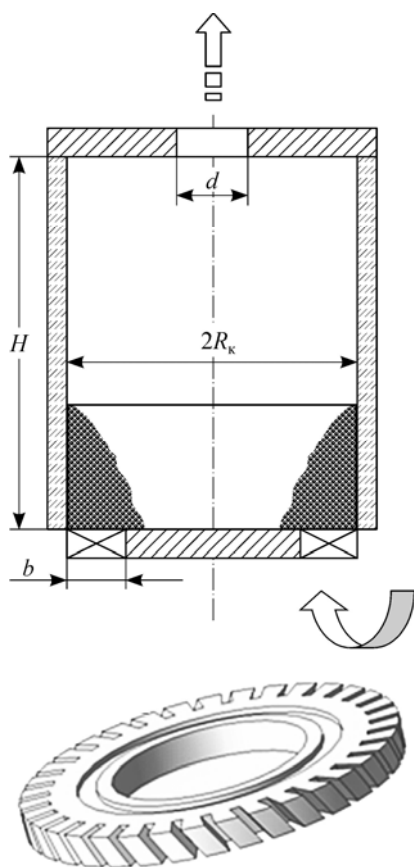


Рис. 1. Схема вихревой камеры с центробежным псевдооживленным слоем твердых частиц.

твердой фазы использовались частицы Al_2O_3 диаметром 3 либо 5 мкм с плотностью материала 1500 кг/м^3 . Эффективный диаметр частиц $d_{\text{эфф}}$ определялся как диаметр сферической частицы одинакового объема с используемыми частицами, форма которых незначительно отличалась от идеальной сферической.

Диагностика скорости частиц в двухфазных потоках является непростой задачей. Один из немногих эффективных экспериментальных методов ее решения основан на применении лазерного доплеровского анемометра (ЛДА). Распределения осредненной скорости перемещения частиц внутри движущегося слоя можно получить с помощью ЛДА при условии, что в среде возникают «окна прозрачности» в достаточном для измерительной системы количестве за разумные времена выборки. Если подобрать размер частиц и характерные размеры всего слоя с учетом специфических особенностей работы процессора доплеровского сигнала, то оказывается возможным проведение измерений с заглублением в толщину материала до 30 мм. Для проведения измерений в боковой стенке вихревой камеры монтировались оптические окна шириной 20 мм. В рассматриваемых экспериментах применялась двухкомпонентная ЛДА-схема, работающая по принципу обратного рассеяния света, которая позволяла проводить измерения тангенциальной и осевой составляющих скорости. При позиционировании измерительного объема внутри слоя измерялись тангенциальная $V_{\varphi p}$ и осевая $U_{z p}$ компоненты скорости движения частиц слоя. За пределами вращающегося слоя система ЛДА настраивалась на измерение тангенциальной V_{φ} и осевой U_z компонент скорости воздушного потока. Детальное описание особенностей использованной ЛДА системы приведено в работе [17].

На внешней (видимой) поверхности вращающегося слоя частиц проведены измерения скорости вращения слоя методом PIV. В аппаратной части PIV размещается непрерывный полупроводниковый лазер мощностью 2 Вт с длиной волны 532 нм и цифровая система ввода изображения «ВИДЕОСКАН-4021/П-200». Лазерный нож проецировался на слой частиц, вращающийся в вихревой камере. Фотокамера располагалась над слоем. Временной разрыв между двумя стробирующими импульсами управления лазера в одной серии составлял 200 мкс. В каждом эксперименте производилось по 1000 пар снимков. Для уменьшения фоновых засветок частички Al_2O_3 были окрашены в черный цвет и покрыты мелкими светоотражающими частицами диаметром 0,1–0,2 мкм. Расчет скорости по полученным снимкам осуществлялся с помощью пакета программ ActualFlow.

Расчет динамики слоя осуществлялся на основе модели взаимопроникающих жидкостей с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Расчеты удержания зернистого слоя в вихревой камере с изотермическим течением газа выполнялись по модели взаимопроникающих жидкостей для турбулентного течения [6].

Уравнение неразрывности для каждой из фаз имеет вид

$$\partial \alpha_q \rho_q / \partial t + \nabla (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) = 0, \quad (1)$$

уравнение количества движения записывается следующим образом:

$$\partial \alpha_q \rho_q \bar{v}_q / \partial t + \nabla (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q \bar{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q \bar{g} + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\bar{v}_p - \bar{v}_q), \quad (2)$$

здесь $\bar{\bar{\tau}}_q$ — тензор напряжений для данной фазы, K_{pq} — коэффициент обмена импульсом между p и q фазами, α_q — объемная доля q фазы в потоке. Коэффициент обмена импульсом между фазами определялся по формуле $K_{pq} = \alpha_p \alpha_q \rho_p f / \tau_p$, где $\tau_p = \rho_p d_p^2 / (18 \mu_e)$ — характерное время релаксации, $f = C_D \text{Re} / 24$ — функция сопротивления частиц, Re — число Рейнольдса, по диаметру частицы и скорости обтекания частицы потоком газа, C_D — коэффициент сопротивления одиночной частицы. Касательные напряжения моделировались с учетом $k-\varepsilon$ модели для каждой фазы. Более детально модель описана в работе [6].

Результаты и их обсуждение

Измерения методом PIV скорости вращения зернистого материала позволили получить значения тангенциальной скорости частиц $V_{\varphi P}$ на внешней свободной границе слоя. Результаты измерений в сравнении с данными, полученными с помощью метода ЛДА, представлены на рис. 2. Измерения проводились без диафрагмирования выходного сечения ($d = 100$ мм). Массовый расход воздуха через вихревую камеру $G \approx 19$ г/с. Диаметр частиц $d_{эфф} = 3$ мм, масса слоя частиц составляла $M = 100$ г. Измерения ЛДА проводились при заглублении на 5 мм от верхней части слоя частиц. Видно, что данные, полученные методами PIV и ЛДА, практически совпадают между собой. На рис. 3 показана зависимость скорости вращения слоя от скорости воздуха в щелях V_0 . Символы 1, 2 — результаты работы [12], обобщающие данные по скорости вращения слоя пшеницы в вихревой камере с боковым цилиндрическим завихрителем. Как показано в работе [12], скорость вращения слоя является линейной функцией скорости воздуха в щелях завихрителя. Символы 3 — результаты измерения методом PIV, выполненные авторами настоящей работы. Символы соответствуют разным опытам, масса слоя в которых менялась от 50 до 120 г. Расходы воздуха, необходимые для организации центробежного слоя, и соответственно диапазон значений $V_{\varphi 0}$ в вихревой камере рассматриваемой геометрии существенно меньше, чем в аппарате с боковым завихрителем. Соответственно меньше и скорость вращения слоя. Символы 4, 5 отображают данные работы [16] о скорости вращения слоя частиц полиэтилена с диаметром частиц 1 мм.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные по скорости движения воздуха над слоем в пространстве, свободном от зернистого материала. Распределения скорости получены для предельных в рассматриваемой конфигурации значений расхода воздуха. Начиная с $G = 15$ г/с частицы слоя вовлекаются во вращение. При расходе воздуха $G > 23$ г/с движение слоя по окружности приобретает «волновой» характер. Амплитуда возмущения возрастает с увеличением расхода воздуха. После достижения некоторого значения расхода амплитуда колебания становится такой, что слой частиц оттесняется от завихрителя, оголяя его. Это приводит к разрушению слоя и катастрофическому выносу частиц за пределы объема вихревой камеры. Внутри диапазона стабильности наблюдаются разные режимы течения в газовой фазе: от квазитвердого вращения (1) до комбинированного (4). Из рисунка видно, что с увеличением входной тангенциальной скорости растет скорость вращения потока и над слоем, причем с увеличением расхода газа возможно образование возвратного течения вблизи оси.

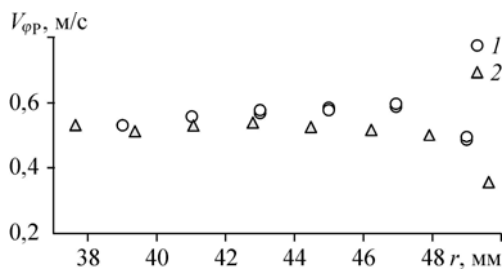


Рис. 2. Скорость вращения слоя частиц, сопоставление результатов измерений, полученных методами PIV (1) и ЛДА (2).
 $M = 100$ г; 1 — $G = 19,6$ г/с, 2 — $G = 18,4$ г/с.

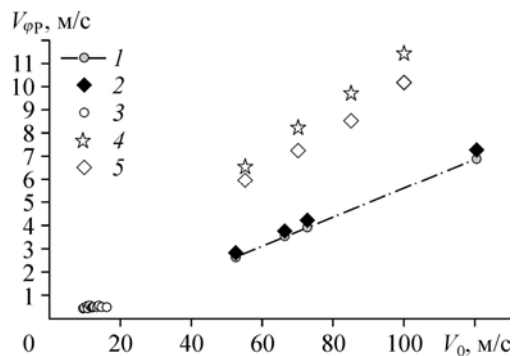


Рис. 3. Зависимость скорости вращения слоя от скорости воздуха в щелях закручивающего аппарата.

Данные работы [12] для зерен пшеницы: $M = 300$ (1), 250 (2); 3 — результаты измерений настоящей работы методом PIV для слоя с частицами Al_2O_3 с $d_{эфф} = 3$ мм при $M = 50-120$ г; 4, 5 — данные работы [16] — гранулы полиэтилена с $d = 1$ мм при $M = 2000$ (4) и при $M = 4000$ (5) г.

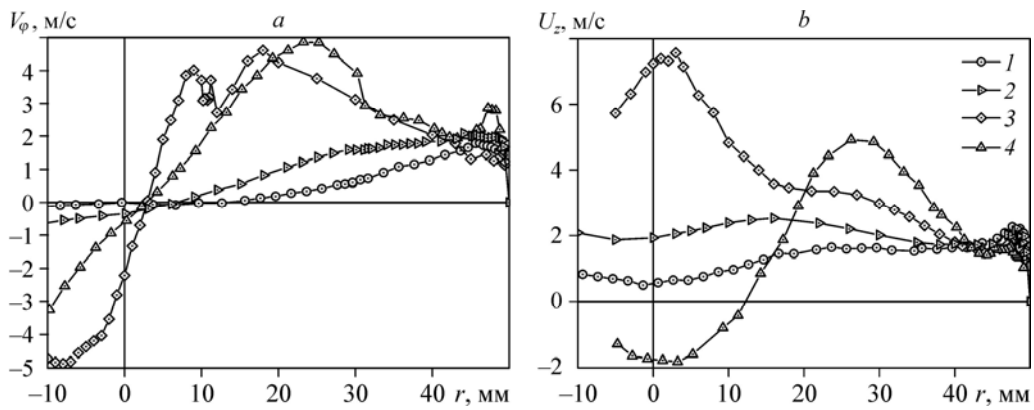


Рис. 4. Радиальные распределения окружной V_φ (a) и осевой U_z (b) компонент вектора скорости воздушного потока при массе слоя частиц 150 г.
 $G = 15$ (1), 18 (2), 21 (3), 23 (4) г/с. на высоте 45 мм от нижнего торца камеры.

Непосредственно вблизи боковой поверхности и для окружной, и для осевой компонент скорости (рис. 5) наблюдается их локальный максимум, по-видимому, обусловленный пристенным течением газового потока. Известно [10], что в потоке газа между неподвижной засыпкой сферических тел и стенкой на расстояниях, меньших диаметра частицы от стенки, локальное значение порозности будет расти. Соответственно, в этой части слоя частиц скорость газового потока будет всегда несколько выше среднего уровня.

На рис. 6 приведены экспериментальные данные по скорости слоя частиц Al_2O_3 диаметром 5 мм на различных высотах h от нижнего торца камеры для двух расходов воздуха и массы слоя. Распределения скорости газового потока (рис. 4) и частиц (рис. 6) показывают, что тангенциальная скорость газа над слоем превышает скорость вращения слоя в 3–5 раз. Аналогичные результаты получены и в расчетах. Сравнение скорости вращения слоя на рис. 6a и 6b показывает, что с увеличением расхода газа сквозь слой частиц растет и скорость вращения слоя.

На рис. 7 показаны расчетные профили тангенциальной скорости частиц и газа для двух режимов течения. Произведя оценку изменения скорости вращения слоя по формуле (5), получим, что увеличение расхода газа и массы слоя на рис. 7b должно привести к среднему увеличению скорости вращения слоя в 1,25 раза по сравнению со случаем,

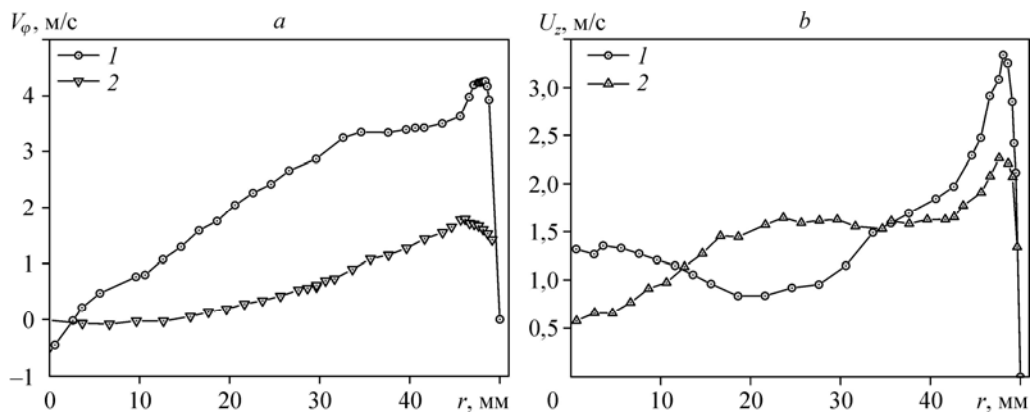


Рис. 5. Радиальные распределения окружной (a) и осевой (b) компонент вектора скорости воздушного потока при массовом расходе воздуха $G = 15$ г/с.
 $M = 100$ (1), 150 (2) г.

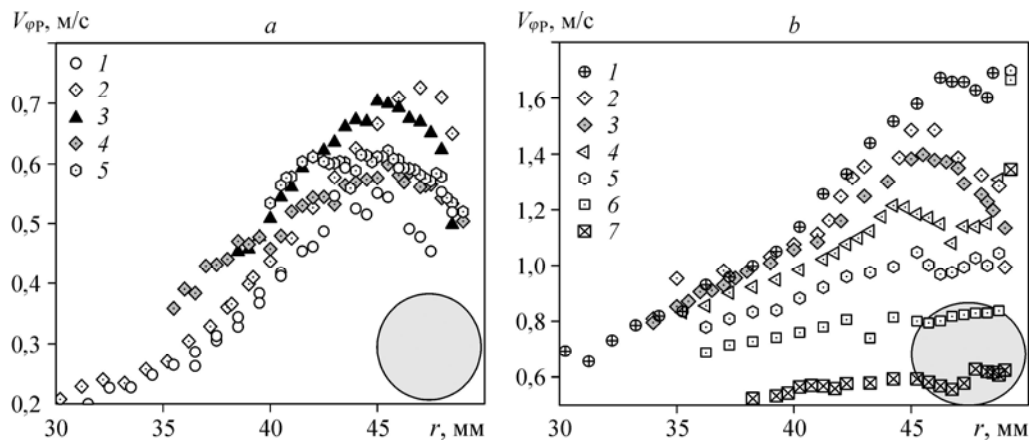


Рис. 6. Распределения окружной скорости частиц Al_2O_3 диаметром $d_{эфф} = 5$ мм.
 а — $G = 15$ г/с, $M = 100$ г, $h = 4,2$ (1), $7,8$ (2), $8,7$ (3), $11,7$ (4), $19,1$ (5),
 б — $G = 23$ г/с, $M = 150$ г, $h = 4$ (1), 7 (2), 12 (3), 16 (4), 21 (5), 26 (6), 36 (7).

изображенным на рис. 7а. Локальное же увеличение максимума скорости вращения на высоте 45 мм от нижнего торца согласно расчетам будет отличаться в 1,38 раза. В целом наблюдается не только качественное, но и количественное соответствие результатов экспериментов и расчетов по динамике закрученного псевдооживленного слоя в вихревой камере с нижним торцевым завихрителем.

На рис. 8 представлены изолинии постоянных значений объемного содержания частиц в вихревой камере с нижним торцевым вдувом. Видно, что с увеличением массы слоя от 100 г с расходом воздуха $G = 15$ г/с (рис. 8а) до 150 г при соответствующем увеличении расхода воздуха до $G = 23$ г/с (рис. 8б) выросла и площадь соприкосновения слоя со стенками. Здесь же оттенками серого показано поле значений U модуля полного вектора скорости воздушного потока. Скорость движения частиц слоя много меньше скорости воздуха, поэтому величины U можно использовать для оценок скорости скольжения, т.е. скорости, с которой воздух обдувает частицу в рассматриваемой точке слоя.

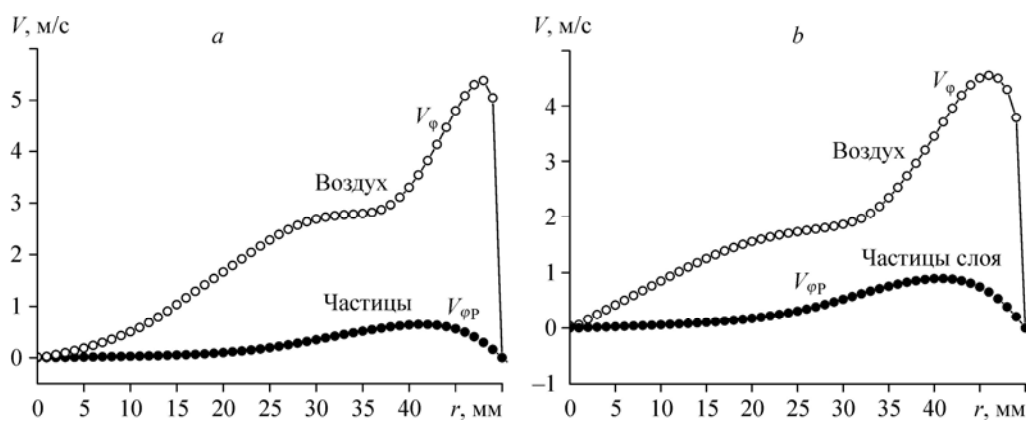


Рис. 7. Распределение окружной скорости газа и частиц диаметром $d_{эфф} = 5$ мм на высоте 45 мм от нижнего торца камеры через 3 секунды после возникновения течения.
 а — $G = 15$ г/с, $M = 100$ г, б — $G = 23$ г/с, $M = 150$ г.

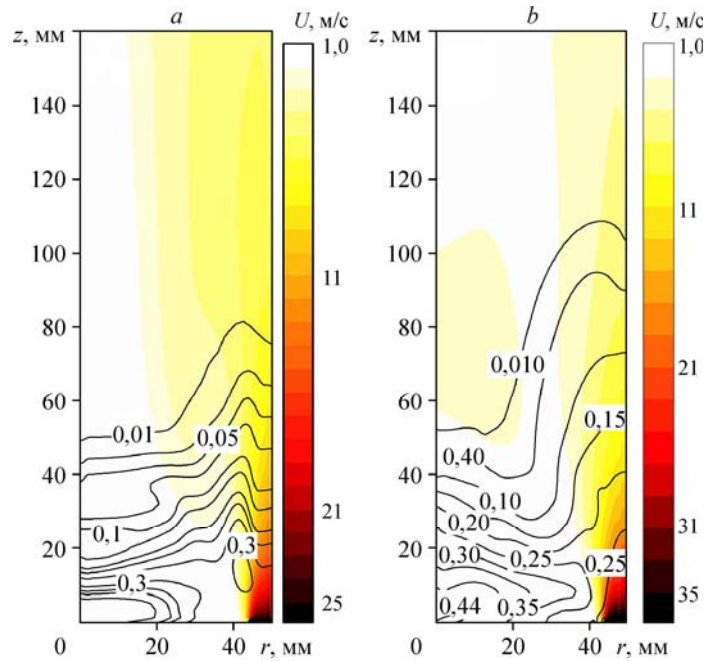


Рис. 8. Распределение объемного содержания частиц диаметром $d_{эфф} = 5$ мм.
 а — $G = 15$ г/с, $M = 100$ г, б — $G = 23$ г/с, $M = 150$ г.

Если записать уравнение баланса момента импульса слоя частиц в вихревой камере [9], то линейная зависимость скорости вращения слоя от скорости газа в завихрителе становится очевидной:

$$G(V_{\phi 0} - V_{\phi})r_s = F_{\text{тр}}r_e. \quad (3)$$

Здесь слева записана потеря потока момента количества движения газом при его взаимодействии со слоем частиц, справа — потери потока момента количества движения слоем частиц за счет трения о стенки. В уравнении описан газовый поток с расходом G , с тангенциальной скоростью $V_{\phi 0}$ на входе в слой и скоростью V_{ϕ} на выходе из слоя, со средним радиусом щелевого аппарата r_s ; сила трения слоя частиц о стенки составляет $F_{\text{тр}}$ на эффективном радиусе контакта слоя со стенками r_e , в рассматриваемой конструкции вихревой камеры для оценочных расчетов можно принять $r_s \approx r_e$. Сила трения слоя о стенку пропорциональна коэффициенту трения $c_f/2$, плотности слоя частиц $\rho_c \approx \rho_p(1 - \varepsilon)$, квадрату скорости вращения слоя $V_{\phi P}^2$ и площади контакта слоя со стенками s :

$$F_{\text{тр}} = \frac{c_f}{2} \rho_c V_{\phi P}^2 s. \quad (4)$$

Поскольку тангенциальная скорость в щелях пропорциональна расходу газа, а скорость вращения газа на выходе из слоя намного ниже, чем на входе, из соотношений (3), (4) получаем практически линейную зависимость вращения слоя от скорости газа в щелях завихрителя. Если теперь принять, что площадь контакта слоя со стенками пропорциональна массе слоя, т.е. $s \approx km_c / \rho_c$, где k — коэффициент пропорциональности между площадью контакта слоя со стенками s и массой слоя m_c , получим, что характерная скорость вращения слоя обратно пропорциональна массе слоя в степени 0,5:

$$V_{\phi P} = \sqrt{G(V_{\phi 0} - V_{\phi})r_s / (r_e km_c c_f / 2)}. \quad (5)$$

Выводы

Измерены скорости движения псевдооживленного слоя в диапазоне размеров частиц 3÷5 мм в вихревой камере с торцевым завихрителем. Максимальные значения измеренной окружной компоненты скорости частиц изменяются по высоте слоя более чем в два раза. Это изменение тем значительнее, чем больше масса слоя. Измерения показали, что при приближении к максимально возможному расходу воздуха, выше которого возникает неустойчивость и начинается разрушение слоя, наблюдается перестройка воздушного потока. В пристенной области появляется возвратное течение, закон распределения окружной компоненты скорости изменяется от квазитвердого вращения до комбинированного. В приосевой области, примыкающей к боковой цилиндрической поверхности, во всех рассмотренных режимах течения наблюдаются локальные максимумы как осевой, так и окружной компонент скорости воздушного потока.

В численном расчете получены данные о распределениях объемной доли частиц и скорости течения газа внутри слоя. Результаты численного моделирования и аналитические оценки показали, что в вихревой камере с торцевым завихрителем трение частиц о внутреннюю поверхность аппарата и подвод потока момента импульса к слою определяют динамику закрученного двухфазного течения.

Список литературы

1. Сыромятников Н.И. Исследование газообразования при турбулентном течении газа в угольном канале // Докл. ДАН СССР. 1954. Т. 97, № 3. С. 281–286.
2. Chen Y.M. Fundamentals of a centrifugal fluidized bed // *AIChE J.* 1987. Vol. 33, iss. 5. P. 722–728.
3. Nakamura H., Kondo T., Watano S. Improvement of particle mixing and fluidization quality in rotating fluidized bed by inclined injection of fluidizing air // *Chemical Engng Sci.* 2013. Vol. 91. P. 70–78.
4. De Wilde J. Gas–solid fluidized beds in vortex chambers // *Chem. Eng. Process: Process Intensif.* 2014. Vol. 85. P. 256–290.
5. Дворников Н.А., Белоусов П.П. Исследование псевдооживленного слоя в вихревой камере // *Прикл. механика и техн. физика.* 2011. Т. 52, № 2. С. 59–65.
6. Волчков Э.П., Дворников Н.А., Лукашов В.В., Бородуля В.А., Теплицкий Ю.С., Пицуха Е.А. Исследование закрученных газодисперсных течений в вихревых камерах различных конструкций при наличии и отсутствии горения // *Инж.-физ. журнал.* 2012. Т. 85, № 4. С. 786–796.
7. Kovacevic J.Z., Pantzali M.N., Heynderickx G.J., Marin G.B. Bed stability and maximum solids capacity in a Gas–Solid Vortex Reactor: Experimental study // *Chemical Engng Sci.* 2014. Vol. 106. P. 293–303.
8. Волчков Э.П., Дворников Н.А., Лукашов В.В., Абрахманов Р.Х. Исследование течения в вихревой камере с центробежным кипящим слоем при отсутствии и наличии горения // *Теплофизика и аэромеханика.* 2013. Т. 20, № 6. С. 679–684.
9. Дворников Н.А., Зинкин П.В., Ядыкин А.Н. Исследование псевдооживления в вихревых камерах для удержания инертного материала // *Тр. III Росс. нац. конф. по теплообмену.* 2002. Т. 5. С. 199–202.
10. Гольдшттик М.А. Вихревые потоки. Новосибирск, 1981. 366 с.
11. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. Новосибирск, 1987. 282 с.
12. 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, № 2–3. С. 72–78.
13. Dodson C.E., Lakshmanan V.I., Laughlin R.G. W., Sridhar R. Flash roasting of sulphide concentrates and leach residues using a torbed reactor // *Proc. of 128th TMS Annual Meeting, 999 February 28–March 4 TMS ANNUAL MEETING, San Diego, California.* P. 233–238.
14. Kaewklum R., Kuprianov V.I. Experimental studies on a novel swirling fluidized-bed combustor using an annular spiral air distributor // *Fuel.* 2010. Vol. 89. P. 43–52.
15. 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. Vol. 54, iss. 8. P. 2029–2044.
16. Kovacevic J.Z., Heynderickx G.J., Marin G.B. Experimental research and analytical modelling of a gas-solid vortex reactor particle technology // *Aiche Annual Meeting: Global Challenges For Engineering a Sustainable Future.* 2013. P. 285–286.
17. Титков В.И., Лукашов В.В. Оценка параметров турбулентных течений с помощью слеящего фильтра комплексной огибающей доплеровского сигнала // *Автометрия.* 2006. Т. 42, № 4. С. 100–108.

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.