

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

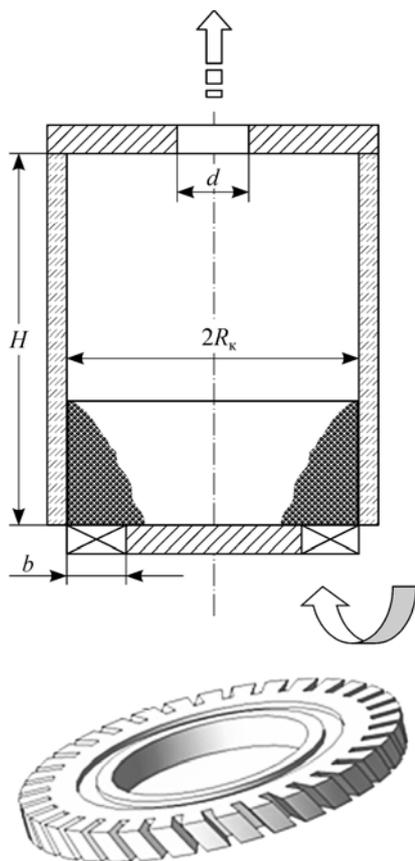


Рис. 1. Схема вихревой камеры с центробежным псевдооживленным слоем твердых частиц.

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.

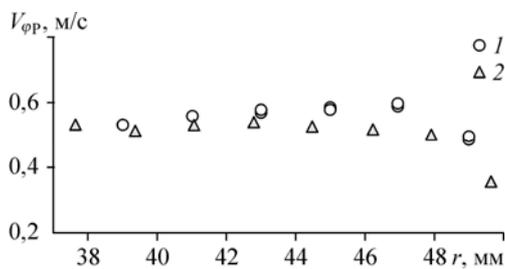


Рис. 2. Скорость вращения слоя частиц, сопоставление результатов измерений, полученных методами PIV (1) и ЛДА (2).
 $M = 100$ г; 1 — $G = 19,6$ г/с, 2 — $G = 18,4$ г/с.

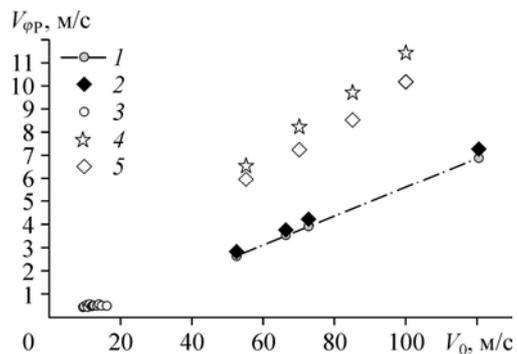


Рис. 3. Зависимость скорости вращения слоя от скорости воздуха в щелях закручивающего аппарата.

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.

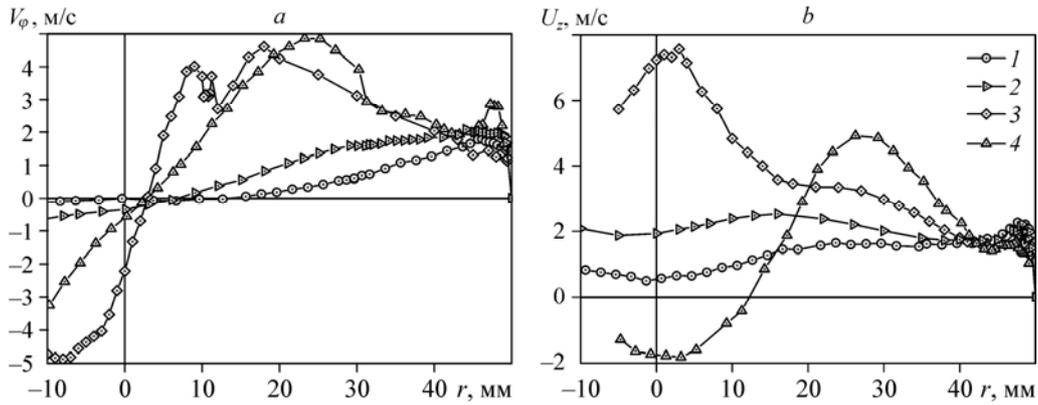


Рис. 4. Радиальные распределения окружной V_φ (a) и осевой U_z (b) компонент вектора скорости воздушного потока при массе слоя частиц 150 г.
 $G = 15$ (1), 18 (2), 21 (3), 23 (4) г/с. на высоте 45 мм от нижнего торца камеры.

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,

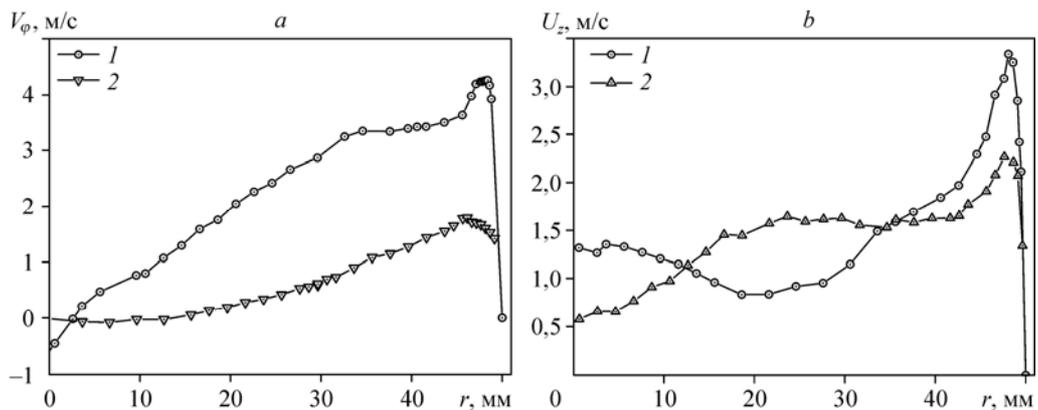


Рис. 5. Радиальные распределения окружной (a) и осевой (b) компонент вектора скорости воздушного потока при массовом расходе воздуха $G = 15$ г/с.
 $M = 100$ (1), 150 (2) г.

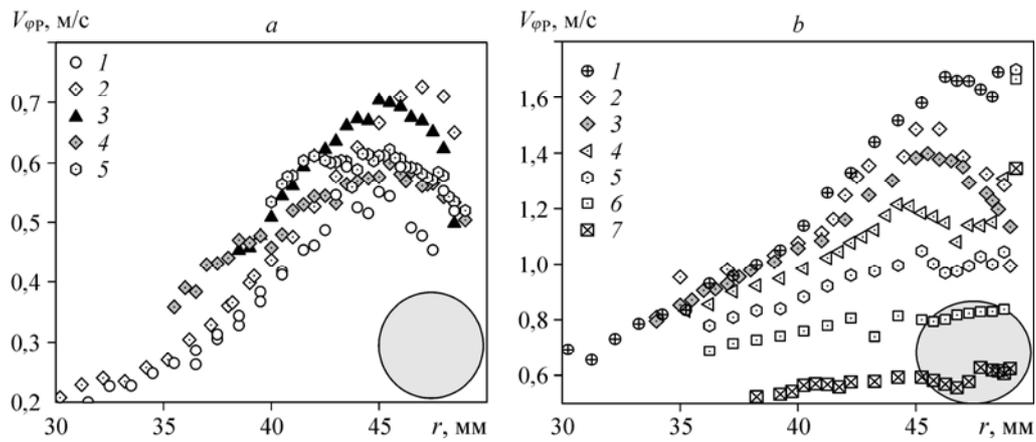


Рис. 6. Распределения окружной скорости частиц Al_2O_3 диаметром $d_{\text{эфф}} = 5$ мм.
 а — $G = 15$ г/с, $M = 100$ г, $h = 4,2$ (1), $7,8$ (2), $8,7$ (3), $11,7$ (4), $19,1$ (5),
 б — $G = 23$ г/с, $M = 150$ г, $h = 4$ (1), 7 (2), 12 (3), 16 (4), 21 (5), 26 (6), 36 (7).

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.

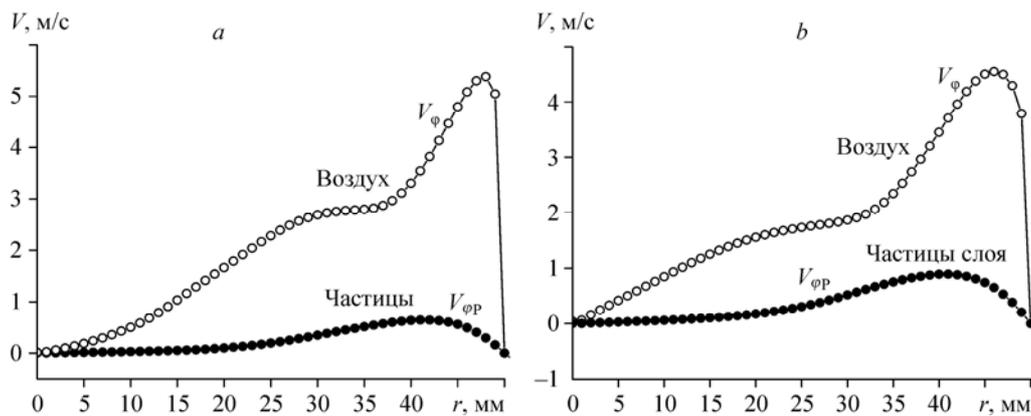


Рис. 7. Распределение окружной скорости газа и частиц диаметром $d_{\text{эфф}} = 5$ мм на высоте 45 мм от нижнего торца камеры через 3 секунды после возникновения течения.
 а — $G = 15$ г/с, $M = 100$ г, б — $G = 23$ г/с, $M = 150$ г.

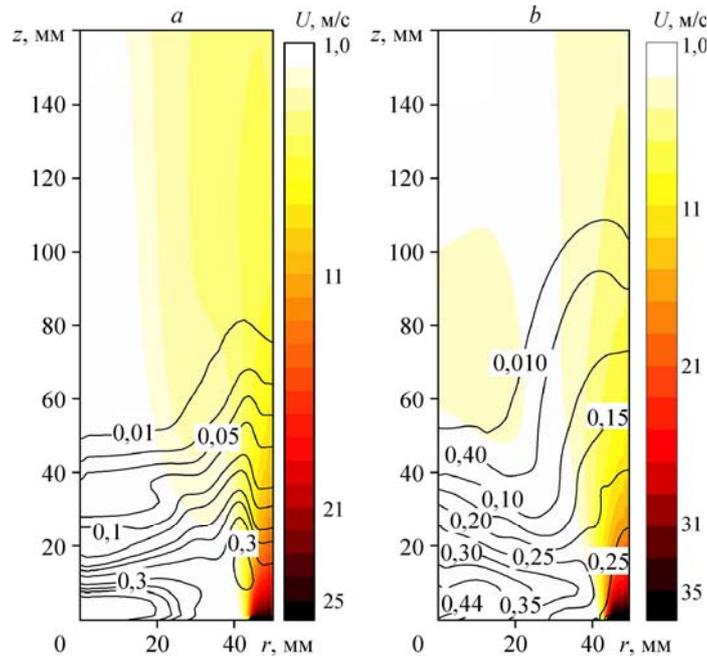


Рис. 8. Распределение объемного содержания частиц диаметром $d_{эфф} = 5$ мм.

a — $G = 15$ г/с, $M = 100$ г, b — $G = 23$ 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.