

УДК 66.096.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

Н. А. Дворников, П. П. Белоусов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

E-mail: lab2-1@itp.nsc.ru

Приведены результаты измерения тангенциальной скорости псевдоожигенного слоя частиц с помощью лазерно-доплеровского измерителя скорости и механической вертушки. На основе численного расчета динамики многофазного потока анализируются причины различий значений скорости вращения слоя, полученных с использованием указанных методов измерения.

Ключевые слова: вихревая камера, динамика закрученного псевдоожигенного слоя.

Цилиндрические, конические и комбинированные вихревые камеры, в которых осуществляется псевдоожигение зернистого материала, используются для реализации тепломассообменных процессов, организации химических реакций, разделения дисперсного материала на крупную и мелкую фракции. Однако информации о динамике псевдоожигенного слоя, закрученного потоком газа в таких камерах, недостаточно [1–4], причем данные о скорости вращения слоя получены с помощью механических датчиков, которые осредняют скорость слоя по толщине и могут дополнительно раскручиваться потоком воздуха, имеющим скорость вращения, на порядок превышающую скорость вращения слоя.

На рис. 1 показана схема конической вихревой камеры с цилиндрической верхней частью, в которой формируется закрученный псевдоожигенный слой. Наличие цилиндрической верхней части камеры позволяет осуществлять эшелонированную (раздельную)

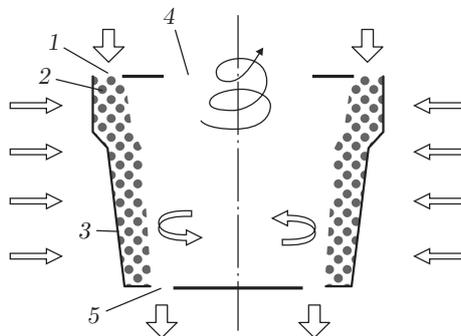


Рис. 1. Схема вихревой камеры, в которой происходит тепломассообмен между газовым потоком и зернистым материалом:

1 — щель в верхнем торце; 2 — цилиндрический завихритель; 3 — конический завихритель; 4 — верхнее выходное отверстие; 5 — кольцевая щель в нижнем торце

подачу воздуха через боковые цилиндрический и конический завихрители, а также через кольцевую щель в верхнем торце, через который подается дисперсный материал в спутном потоке воздуха. Вихревая камера общей высотой 0,127 м состоит из верхнего цилиндрического завихрителя (высота 0,032 м, диаметр 0,260 м), нижнего конического завихрителя (высота 0,083 м, диаметр верхней части 0,230 м, нижней — 0,200 м) и переходного конического завихрителя (высота 0,012 м, диаметр верхней части 0,260 м, нижней — 0,230 м), который соединяет верхний цилиндрический и нижний конический завихрители. Нижний конический завихритель граничит с нижней торцевой стенкой, в которой прорезана кольцевая щель для вывода сыпучего материала в бункер. В верхнем цилиндрическом завихрителе от верхней кромки прорезано 54 щели шириной 0,0015 м и высотой 0,023 м с углом между осью плоской щели (линией, равноудаленной от противоположных стенок щели) и радиусом завихрителя, равным  $73^\circ$ . В переходном коническом завихрителе снизу прорезано 40 щелей шириной 0,0015 м и высотой 0,01 м с углом между осью плоской щели и радиусом завихрителя, равным  $73^\circ$ . В нижнем коническом завихрителе начиная от верхней и нижней кромок прорезано по 40 щелей высотой 0,038 м и шириной 0,0015 м с углом между осью щелей и радиусом завихрителя, равным  $60^\circ$ . Между верхними и нижними щелями нижнего конического завихрителя имеется сплошная непроницаемая коническая стенка высотой 0,007 м, к которой примыкают 40 верхних и 40 нижних щелей. Материал плотностью  $1420 \text{ кг/м}^3$  (диаметр частиц 0,0035 м) с начальной скоростью вращения, равной 2 м/с, подается через периферийную щель шириной 0,02 м в верхнем торце камеры. Формирующийся слой частиц поступает в верхнюю камеру с цилиндрическим завихрителем, а затем в коническую камеру с боковым завихрителем. Через цилиндрический и конический боковые завихрители подается воздух. При непрерывной подаче частиц часть вращающегося слоя ссыпается по коническому завихрителю через кольцевую щель (внешний диаметр 0,160 м, внутренний — 0,120 м) в нижнем торце камеры, воздух уходит через верхнее центральное отверстие (диаметр 0,160 м) в камеру в вентилятор, создающий разрежение в вихревой камере, за счет чего воздух поступает через систему пневмотранспорта материала в верхнюю кольцевую щель, через верхний воздухопровод в тракт подачи воздуха на верхний цилиндрический и переходный конический завихрители и через нижний воздухопровод на нижний конический завихритель. Верхний и нижний воздухопроводы, направленные на боковые завихрители, снабжены расходомерными шайбами, воздухопровод, предназначенный для пневмотранспорта материала, оборудован ротаметром.

Расход газа контролировался с помощью расходомерных шайб и ротаметров отдельно для транспортирующих дисперсный материал потоков газа, подаваемых в камеру через верхнюю кольцевую щель, через цилиндрический и переходный конический верхние боковые завихрители и через нижний конический завихритель. Расход материала определялся как средний расход загруженного в бункер питателя материала за промежуток времени, в течение которого материал переходит из бункера в вихревую камеру. Определенные в эксперименте расходы газа и материала использовались при выполнении расчетов. Контроль неравномерности полной скорости по высоте щелей на выходе из них для верхних завихрителей и нижнего конического завихрителя показал, что отклонение локальной скорости не превышает 20 % среднерасходной скорости.

Проведены эксперименты по изучению аэродинамики вихревой камеры с конусной решеткой и определению скорости вращения псевдооживленного слоя бесконтактным методом с помощью лазерно-доплеровского измерителя скорости (ЛДИС), а также с помощью механического датчика, представляющего собой вертушку с коромыслом из стальной проволоки диаметром 0,001 м с плоскими элементами диаметром 0,008 м на концах коромысла, погруженными во вращающийся слой.

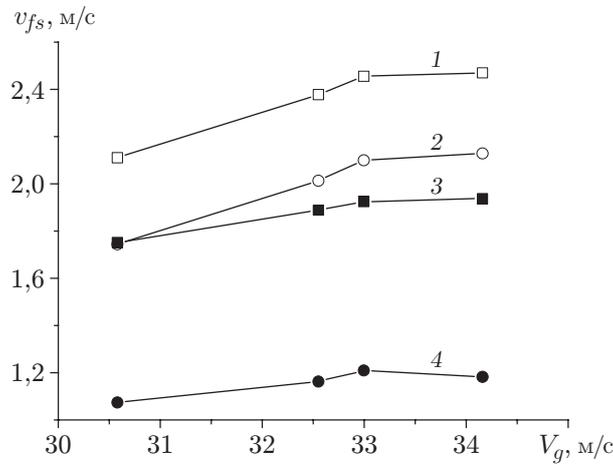


Рис. 2. Зависимость тангенциальной скорости псевдооживленного слоя в верхней цилиндрической (1, 3) и нижней конической (2, 4) частях камеры от средней скорости газа в щелях:

1, 2 — результаты измерений с помощью вертушки, 3, 4 — результаты измерений с помощью ЛДИС

На поверхности решетки завихрителя имелось два окна для проведения оптических наблюдений за слоем. Вихревая камера работала в режиме отсоса воздуха из помещения с комнатной температурой и нормальным давлением.

**1. Средние скорости слоя, измеренные с помощью ЛДИС и вертушки.** На базе однокомпонентного ЛДИС с возможностью измерения поперечной составляющей скорости проведены исследования по определению тангенциальной скорости вращения псевдооживленного слоя в вихревой камере на высоте 0,04 м (коническая часть камеры) и 0,105 м (цилиндрическая часть камеры) от дна вихревой камеры при изменении расхода воздуха через камеру от 0,283 до 0,316 м<sup>3</sup>/с. На рис. 2 показана зависимость скорости вращения слоя от средней скорости газа в щелях, определенной как отношение объемного расхода газа к площади щелей. Скорость вращения слоя измерялась с помощью механической вертушки и ЛДИС. Различия значений скорости, полученных этими способами, по-видимому, обусловлены неравномерным распределением скорости по толщине слоя частиц (с помощью ЛДИС измерялась скорость частиц, непосредственно соприкасающихся с завихрителем, а с помощью вертушки — средняя скорость слоя), а также дополнительной раскруткой вертушки газом, тангенциальная скорость которого превышает тангенциальную скорость слоя.

Для того чтобы установить причину различия значений скорости вращения слоя, измеренной с помощью вертушки и ЛДИС, выполнен расчет движения слоя частиц по модели, описанной в работе [5]. Ниже приведены основные уравнения из этой работы.

**2. Модель расчета параметров вращающегося псевдооживленного слоя в вихревой камере.** Расчеты параметров вращающегося зернистого слоя в вихревой камере выполнялись по эйлеровой модели ламинарного течения взаимопроникающих жидкостей.

Уравнения для газообразной (величины с индексом  $g$ ) и твердой (величины с индексом  $s$ ) фаз в отсутствие массообмена между ними приведены ниже.

Для газовой фазы уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial \alpha_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{V}_g) = 0$$

( $\alpha_g$  — объемная доля газа в смеси газа с частицами). Уравнение количества движения записывается в виде

$$\frac{\partial \alpha_g \rho_g \mathbf{V}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{V}_g \mathbf{V}_g) = -\alpha_g \nabla p_g + \nabla \cdot \tau_g + \alpha_g \rho_g \mathbf{g} + \beta(\mathbf{V}_s - \mathbf{V}_g),$$

где  $\tau_g$  — тензор напряжений для газообразной фазы:

$$\tau_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \mathbf{V}_g + \nabla \mathbf{V}_g^T) + \alpha_g (\lambda_g - (2/3)\mu_g) \nabla \cdot \mathbf{V}_g \mathbf{I},$$

$\mathbf{I}$  — единичный тензор. Объемная вязкость газа  $\lambda_g$  принята равной нулю, сдвиговая вязкость газа принималась постоянной и составляла  $1,85 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

Для твердой фазы уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial \alpha_s \rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{V}_s) = 0$$

( $\alpha_s$  — объемная доля твердой фазы в смеси газа с частицами). Уравнение количества движения записывается в виде

$$\frac{\partial \alpha_s \rho_s \mathbf{V}_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{V}_s \mathbf{V}_s) = -\alpha_s \nabla p_s + \nabla \cdot \tau_s + \alpha_s \rho_s \mathbf{g} + \beta(\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_s).$$

Здесь  $\tau_s$  — тензор напряжений для твердой фазы:

$$\tau_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \mathbf{V}_s + \nabla \mathbf{V}_s^T) + \alpha_s (\lambda_s - (2/3)\mu_s) \nabla \cdot \mathbf{V}_s \mathbf{I}.$$

Объемная вязкость твердой фазы равна  $\lambda_s = (4/3)\rho_s d_s g_0 (1+e)(T/\pi)^{1/2}$ . Сдвиговая вязкость твердой фазы определялась по формуле

$$\mu_s = (4/5)\alpha_s \rho_s d_s g_0 (1+e)(T/\pi)^{1/2}.$$

Давление в твердой фазе равно  $p_s = p_g + p_{s0}$ . Здесь  $p_{s0}$  — давление в дисперсной фазе:

$$p_{s0} = \rho_s (1 + 2(1+e)\alpha_s g_0) T,$$

величина  $T$  характеризует энергию пульсационного движения частиц дисперсного материала и определяется, так же как и температура газа, через пульсационную скорость движения молекул:  $3T/2 = \langle V_s'^2 \rangle / 2$ ;  $e$  — коэффициент восстановления при соударении частиц;  $\rho_s$  — плотность материала частицы;  $g_0 = [1 - (\alpha_s / \alpha_{s\max})^{1/3}]^{-1}$  — радиальная функция распределения частиц, характеризующая безразмерное расстояние между поверхностями соударяющихся частиц.

Уравнение для пульсационной энергии частиц  $T$  имеет вид

$$\frac{3}{2} \left( \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s T) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{V}_s T) \right) = \tau_s : \nabla \mathbf{V}_s - \nabla \cdot \mathbf{q} - \gamma - 3\beta T,$$

где  $\gamma$  — диссипация энергии соударяющихся частиц:

$$\gamma = 3(1 - e^2)\alpha_s^2 \rho_s g_0 T [(4/d_s)(T/\pi)^{1/2} - \nabla \cdot \mathbf{V}_s],$$

$\mathbf{q}$  — поток пульсационной энергии частиц:

$$\mathbf{q} = k \nabla T,$$

$k$  — коэффициент переноса пульсационной энергии:

$$k = 2\rho_s \alpha_s^2 d_s (1+e) g_0 (T/\pi)^{1/2},$$

$\beta$  — коэффициент сопротивления:

— для плотных слоев дисперсного материала ( $\alpha_g < 0,8$ )

$$\beta = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_g \alpha_s |\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_s|}{d_s},$$

— для разреженных слоев ( $\alpha_g \geq 0,8$ )

$$\beta = \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_g \alpha_g \alpha_s |\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_s|}{d_s} \alpha_g^{-2,65},$$

$C_d = 24(1 + 0,15 \text{Re}_s^{0,687}) / \text{Re}_s$  при  $\text{Re}_s < 1000$  и  $C_d = 0,44$  при  $\text{Re}_s \geq 1000$ .

Задача решалась в трехмерной стационарной постановке в декартовой системе координат с заданными расходом воздуха ( $0,283 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и плотностью ( $1,22 \text{ кг}/\text{м}^3$ ). Расход зернистого материала равен  $0,278 \text{ кг}/\text{с}$ , диаметр частиц —  $0,0035 \text{ м}$ , плотность материала —  $1400 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Материал подавался через верхнюю кольцевую щель (см. рис. 1) с начальной тангенциальной скоростью, равной  $2 \text{ м}/\text{с}$ . В расчетах скорость на выходе из щелей принималась равной среднерасходной скорости для каждого из трех эшелонов подачи газа, определенной по экспериментально установленным расходам газа в верхнем кольцевом, верхнем боковом (включая цилиндрическую и переходную коническую части) и нижнем коническом завихрителях. Расчеты проведены при следующих значениях расхода газа: через верхнюю кольцевую щель —  $0,034 \text{ кг}/\text{с}$  (тангенциальная скорость на входе равна  $20 \text{ м}/\text{с}$ ), через верхние цилиндрический и переходный конический завихрители —  $0,099 \text{ кг}/\text{с}$ , через нижний конический завихритель —  $0,15 \text{ кг}/\text{с}$ . Для выхлопного отверстия задавался расход газа, равный суммарному расходу входящих потоков, для кольцевого выходного отверстия задавался нулевой расход газа. Суммарный расход дисперсного материала через выхлопное и кольцевое отверстия задавался равным расходу материала на входе в камеру.

В качестве граничных условий для газа принимались условия прилипания на стенках и заданный расход газа в щелях завихрителя. Для дисперсного материала принимались условие непроницаемости на стенках и условие скольжения [5], которое определялось интерполяцией тангенциальной компоненты скорости вдоль нормальной к стенке координаты:

$$v_{st}|_w = \lambda_s \frac{\partial V_{st}}{\partial x_n} \Big|_w \quad \left( \lambda_s = \frac{d_s}{\alpha_s^{1/3}} \right).$$

Граничное условие для пульсационной энергии частиц  $T$  ставилось аналогично граничному условию для тангенциальной скорости дисперсного материала [5]. Расчет стационарных уравнений выполнялся методом контрольного объема с использованием схемы второго порядка QUICK [7] с аппроксимацией против потока функций и производных квадратичным полиномом. Полученные результаты приведены ниже.

**3. Результаты расчета параметров вращающегося слоя.** На рис. 3 представлены расчетные профили объемной доли дисперсного материала в верхней цилиндрической части камеры в горизонтальном сечении на высоте  $0,105 \text{ м}$  (в цилиндрической части камеры) и  $0,040 \text{ м}$  от дна камеры через  $10 \text{ с}$  после начала подачи материала и воздуха (что соответствует двукратной смене объема дисперсного материала, подаваемого в камеру).

Вблизи стенки объемная доля частиц  $\alpha_s$  уменьшается, что может быть обусловлено как соударением частиц со стенками, так и оттеснением их от стенки подаваемыми из завихрителя струями газа, имеющими большую начальную скорость и в тангенциальном, и в радиальном направлениях.

На рис. 4 показаны расчетные радиальные профили тангенциальной скорости слоя частиц и газа в верхней цилиндрической и нижней конической частях камеры в один и тот же

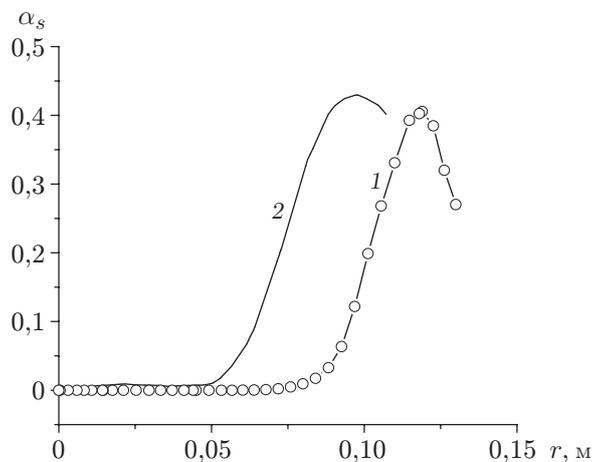


Рис. 3. Профили объемной доли частиц в верхней (1) и нижней (2) частях камеры

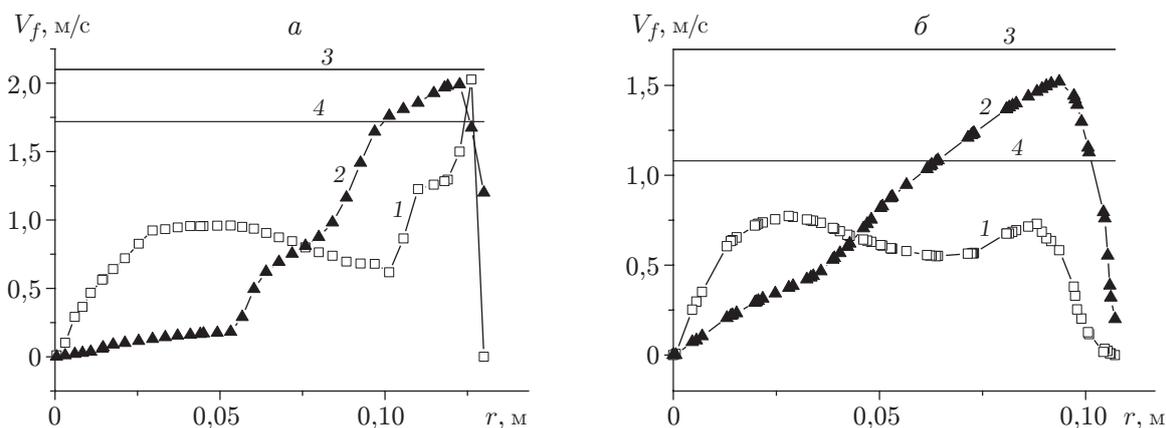


Рис. 4. Профили тангенциальной скорости газа и частиц:

*a* — сечение на расстоянии 0,105 м от дна камеры, *б* — сечение на расстоянии 0,04 м от дна камеры; 1, 2 — результаты расчета (1 — тангенциальная скорость газа, деленная на 10); 3, 4 — экспериментальные данные (3 — скорость, измеренная вертушкой; 4 — скорость, измеренная ЛДИС)

момент времени. Также на рис. 4 приведены значения тангенциальной скорости слоя, измеренные с помощью ЛДИС и вертушки в тех же сечениях. Видно, что значения скорости слоя, измеренные с использованием ЛДИС, несколько занижены по сравнению с максимальным значением, а измеренные с помощью вертушки — завышены. Это объясняется торможением слоя в пристенной области, где проводились измерения с использованием ЛДИС, и влиянием тангенциальной скорости газа на вертушку, значительно превышающей скорость слоя.

Авторы выражают благодарность П. В. Зинкину за участие в проведении экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волчков Э. П., Кайданик А. Н., Ядыкин А. Н. Влияние вращающегося слоя зернистого материала на параметры газового потока в вихревой камере сгорания // Сиб. физ.-техн. журн. 1991. Вып. 5. С. 102–105.

2. **Волчков Э. П., Кайданик А. Н., Терехов В. И., Ядыкин А. Н.** Аэродинамика и тепло-массообмен в вихревой камере с центробежным псевдооживленным слоем частиц // Теорет. основы хим. технологии. 1993. Т. 27, № 3. С. 258–263.
3. **Волчков Э. П., Дворников Н. А., Ядыкин А. Н.** Моделирование сушки и удержания зерна в вихревых камерах с протоком воздуха через слой зерна // Пром. теплотехника. 1999. Т. 21, № 2/3. С. 72–78.
4. **Волчков Э. П., Дворников Н. А., Ядыкин А. Н.** Особенности тепло- и массообмена в псевдооживленном слое частиц в вихревой камере // 4-й Минский междунар. форум “Тепло-массообмен”, Минск, 22–26 мая 2000 г. Минск: Изд-во АНК ИТМО им. А. В. Лыкова НАНБ, 2000. Т. 6. С. 115–124.
5. **Ding J., Gidaspow D.** A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow // AIChE J. 1990. V. 36, N 4. P. 523–538.
6. **Patankar S. V.** Numerical heat transfer and fluid flow. N. Y.: Hemisphere, 1980.
7. **Leonard B. P.** Order of accuracy of QUICK and related convection-diffusion schemes: Rep. / NASA. N E-8236, ICOMP-93-47, NAS 1.15:106402, NASA-TM-106402. Cleveland (Ohio), 1993. [Electron resource]. [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940017115\\_1994017115.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940017115_1994017115.pdf).

*Поступила в редакцию 5/VI 2009 г.,  
в окончательном варианте — 19/III 2010 г.*

---