

УДК 532.529

Исследование течения в вихревой камере с центробежным кипящим слоем при отсутствии и наличии горения

Э.П. Волчков, Н.А. Дворников, В.В. Лукашов, Р.Х. Абдрахманов

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

E-mail: luka@itp.nsc.ru

Проведены экспериментальные исследования и численное моделирование течения в вихревой камере с центробежным псевдооживленным кипящим слоем твердых частиц. Рассмотрены камеры различной конфигурации, что позволяло изменять соотношение центробежных сил и сил тяжести. Предложена простая модель для оценки гидравлических потерь в вихревой камере.

Ключевые слова: вихревая камера, центробежный кипящий слой.

Введение

Кипящий слой в поле силы тяжести широко применяется в различных технологических установках. Однако интенсивность процессов при таком способе псевдооживления лимитируется гравитационными силами, имеются проблемы с объемной однородностью тепло- и массообмена в слое. Применение центробежного псевдооживленного слоя в тепломассообменных аппаратах позволяет увеличить интенсивность процессов за счет большей скорости обтекания частиц, подавления образования пузырей в слое.

Для организации слоя частиц в поле центробежных сил могут быть использованы различные типы вихревых камер, например, вращающаяся камера [1], камера с неподвижной цилиндрической стенкой и вращающимся воздухораспределительным торцом [2], различные варианты вихревых камер с неподвижными стенками, в которых слой частиц формируется за счет закрутки потока [3–6].

Характеристики слоя частиц в поле центробежных сил зависят как от конфигурации вихревой камеры, так и от свойств самого зернистого материала, и прежде всего от плотности и размеров частиц [6–8]. В настоящей работе рассматривались три варианта организации потока подаваемого в камеру газа (рис. 1) с углом раскрытия образующей щелевого завихрителя 0; 45 и 90 градусов относительно оси камеры. Исследовались случаи однофазного потока и течения в камере с центробежным псевдооживленным слоем дисперсного материала частиц (гранулы Al_2O_3 с диаметром частиц 1–4 мм и их плотностью 1500 кг/м^3) в изотермическом течении с подачей воздуха с температурой $20 \text{ }^\circ\text{C}$, а также при горении пропан-бутана с подогревом смеси воздуха и топлива перед подачей в камеру сгорания.

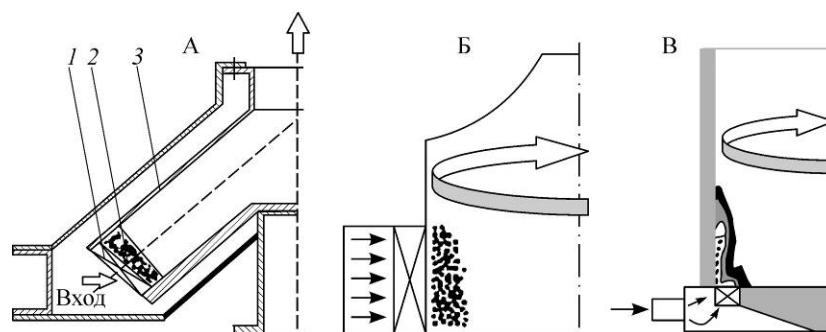


Рис. 1. Рассматриваемые типы вихревых камер с центробежным псевдооживленным слоем.

А — коническая камера (радиус камеры $R_k = 174$ мм, диаметр выходного отверстия $d = 60$ мм), Б — цилиндрическая камера с боковым щелевым завихрителем (радиус камеры $R_k = 100$ мм, диаметр выходного отверстия $d = 60$ мм, высота цилиндрической части камеры $L = 100$ мм), В — цилиндрическая камера с торцевым завихрителем ($R_k = 50$ мм, $L = 150$ мм); 1 — щелевой завихритель, 2 — слой частиц, 3 — корпус камеры.

Особенности поведения центробежного слоя частиц

Эксперименты проводились в трех типах вихревых камер, схематично показанных на рис. 1. Измерения распределений окружной и осевой компонент скорости осуществлялись с помощью двухкомпонентного лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) в изотермическом потоке воздуха при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ в сечении, расположенном над вращающимся слоем частиц (в камерах Б и В). Особенности работы регистрирующей аппаратуры описаны в работе [9]. В качестве светорассеивающих центров использовался порошок Al_2O_3 (2–8 мкм).

Опыты, проведенные в конической камере А, а также в камере В с торцевым завихрителем (рис. 1), выявили высокую стабильность центробежного псевдооживленного слоя [4]. При использовании частиц оксида алюминия диаметром 1...3 мм формировался устойчивый слой, отсутствовали неконтролируемый вынос и истирание зернистого материала в течение длительного времени. В цилиндрической камере типа Б тех же размеров критический вынос частиц из слоя и его разрушение происходило за 10...15 минут. Высокая стабильность слоя сохранялась и при нагреве несущего потока до $450\text{ }^\circ\text{C}$, что позволило, в частности, реализовать процесс беспламенного окисления пропан-бутана (75 % пропана, 25 % бутана) в воздухе во вращающемся слое катализатора в конической камере А и во вращающемся слое инертного материала в камере В (рис. 2). Оказалось, что при организации горения в вихревой камере устойчивый слой дисперсной

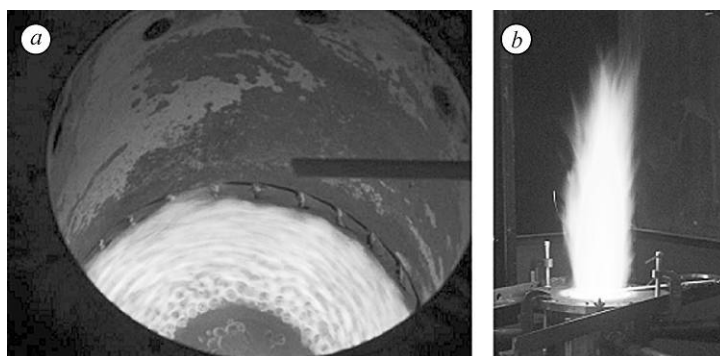


Рис. 2. Режимы горения пропан-бутана в вихревой камере В.

а — без пламени, б — с образованием факела.

фазы формируется при более низких расходах газа (в 1,5...2 раза) по сравнению с изотермическим случаем при температуре воздуха 20 °С. Уровень NO в выходящих газах в этом случае не превышал 20 ppm.

Расчеты удержания зернистого слоя в вихревой камере с изотермическим течением газа выполнялись по модели взаимопроникающих жидкостей для турбулентного течения [4].

Уравнение неразрывности для каждой из фаз при отсутствии массообмена между фазами имеет вид:

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) = 0,$$

уравнение количества движения —

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

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 $K_{pq} = \frac{\alpha_p \alpha_q \rho_p f}{\tau_p}$, где $\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_e}$ —

характерное время релаксации, $f = \frac{C_D \text{Re}}{24}$ — функция сопротивления, C_D — коэффи-

циент сопротивления одиночной частицы. Касательные напряжения моделировались с учетом $k-\varepsilon$ модели для каждой фазы. Более детально модель описана в работе [4]. Расчеты были выполнены на программе FLUENT, установленной в Сибирском суперкомпьютерном центре коллективного пользования.

Течение в вихревой камере

Визуальные наблюдения слоя в камере А (рис. 1) при изотермическом течении показали, что слой устойчиво вращается без заметных пульсаций поверхности слоя. Выноса частиц (изменения массы слоя при взвешивании материала до начала и после окончания опыта) не обнаружено после трех часов работы камеры.

В камере В частицы слоя двигались вдоль цилиндрической поверхности камеры примерно под углом 30–40 градусов по отношению к торцу камеры, достигали верхней точки слоя и затем опускались к основанию слоя (слой пульсировал в вертикальном направлении). В ходе экспериментов было обнаружено, что слой частиц в камере В остается устойчивым и при сокращении высоты камеры до высоты вращающегося слоя. Камера с торцевым завихрителем (В) позволяет формировать устойчивый слой с массой большей, чем в случае использования цилиндрического бокового завихрителя (Б). Неконтролируемый вынос частиц из слоя не превышал 7 % от начальной массы за время эксперимента (3 часа). Однако для камеры В существует критический расход несущего газа, выше которого слой становится неустойчивым и резко возрастает вынос частиц из камеры. Камера типа Б позволяла удерживать слой в течении 10–15 минут, после чего вынос частиц не позволял формировать сплошной слой частиц.

Результаты измерений динамики изотермического течения показали, что наличие слоя частиц в вихревой камере приводит к снижению величины момента количества движения (рис. 3).

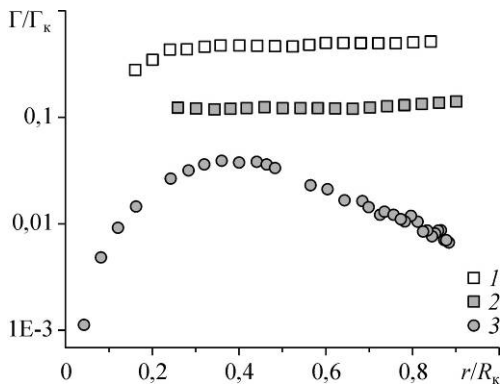


Рис. 3. Безразмерный момент количества движения потока в цилиндрической камере. Камера Б: однофазное течение (1), масса частиц 50 г (2); камера В: масса частиц 140 г, $d = 20$ мм (3).

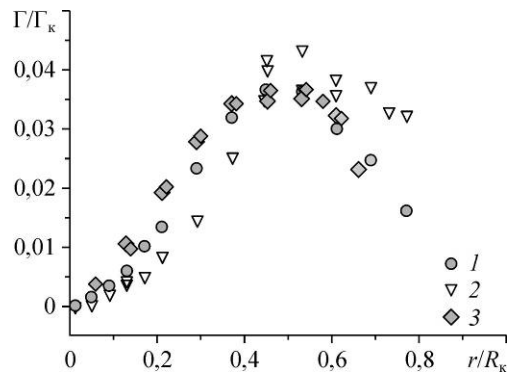


Рис. 4. Распределение безразмерной циркуляции в вихревой камере В с торцевым завихрителем. Масса частиц слоя 100 г, массовый расход воздуха 24 г/с; $d = 20$ (1), 56 (2), 100 (3) мм.

Характер распределения безразмерной циркуляции (отнесенной к ее значению на выходе из завихрителя) в вихревой камере с торцевым завихрителем В отличен от закономерностей течения в камере с боковым цилиндрическим завихрителем Б. В камере с боковым цилиндрическим завихрителем момент количества движения в области $0,2 < r/R_k < 0,9$ остается практически постоянным.

При использовании торцевого завихрителя В в распределение безразмерной циркуляции по радиусу в области, удаленной от боковой стенки, наблюдается максимум. Изменение диаметра выходного отверстия вихревой камеры с торцевым завихрителем от $d = 20$ мм до $d = 100$ мм слабо меняет распределение циркуляции по радиусу в камере (рис. 4). Отличия в распределении циркуляции для представленных случаев, возможно, связаны с тем, что при увеличении диаметра диафрагмы, как видно из данных, представленных на рис. 5, в приосевой области появляется возвратное течение.

На рис. 6 представлены радиальные профили тангенциальной скорости газа при наличии частиц в камере В, измеренной с помощью ЛДА и рассчитанной по $k-\epsilon$ модели в сечении на расстоянии 66 мм от нижнего торца камеры. Учитывая, что дисперсная фаза на порядок снижает тангенциальную скорость газового потока, соответствие расчета

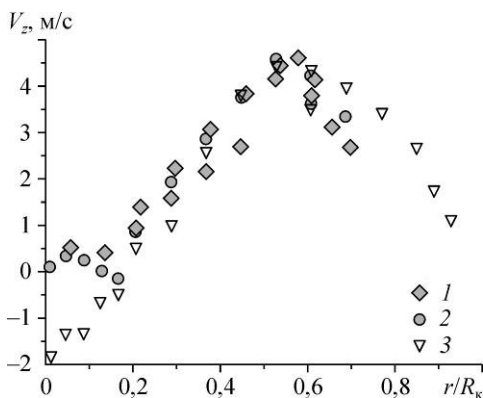


Рис. 5. Распределение осевой компоненты скорости в вихревой камере В. $d = 20$ (1), 56 (2), 100 (3) мм.

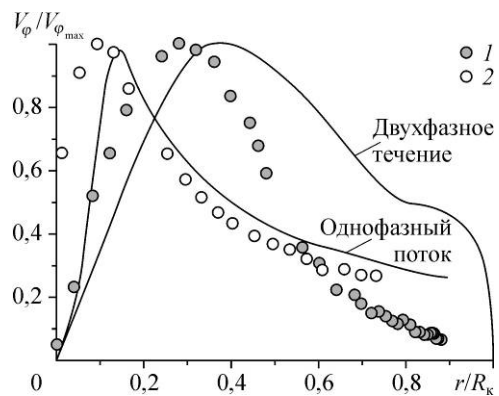


Рис. 6. Тангенциальная скорость газа в камере В. $d = 20$ мм; линии — расчет в соответствии с $k-\epsilon$ моделью турбулентности; измерение с помощью ЛДА с массой слоя $M = 140$ (1), 0 (2) г.

и эксперимента удовлетворительное. В случае однофазного потока использовалась модифицированная $k-\varepsilon$ модель турбулентности, учитывающая влияние массовых сил на турбулентность [10, 11], которая позволила получить несколько лучшее соответствие экспериментальным данным, чем стандартная $k-\varepsilon$ модель, использованная при расчете двухфазного течения.

Гидравлическое сопротивление вихревой камеры

Важной характеристикой теплообменного аппарата является зависимость потерь давления от расхода газа, проходящего через него. В наших опытах потери давления определялись путем измерения разности давления между окружающей атмосферой и избыточным давлением перед завихрителем. Результаты измерений и расчетов по формулам, приводимым ниже, отражены на рис. 7. Линиями нанесены расчетные зависимости. Как видно из представленных данных, в камерах различного типа зависимость перепада давления от скоростного напора воздуха в щелях закручивающего аппарата $\rho V_0^2 / 2$ имеет линейный характер.

Для оценки гидравлических потерь была рассмотрена простая модель, учитывающая факторы, влияющие на гидравлические потери. Примем, что потери давления в камере являются суммой потерь давления на завихрителе, потерь при прохождении газом зоны от боковой стенки до радиуса выхлопного отверстия и потерь внутри зоны, ограниченной радиусом выхлопного отверстия:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3. \quad (1)$$

Определим потери давления на завихрителе, используя интеграл Бернулли:

$$\Delta P_1 = \frac{\rho V_0^2}{2}. \quad (2)$$

Здесь V_0 — полная средняя скорость в щелях. С учетом того, что при прохождении слоя частиц тангенциальная скорость газа падает в α_1 раз, а также принимая, что в зоне от боковой стенки камеры до радиуса выхлопного отверстия циркуляция постоянна, изменение давления в этой зоне может быть записано в виде

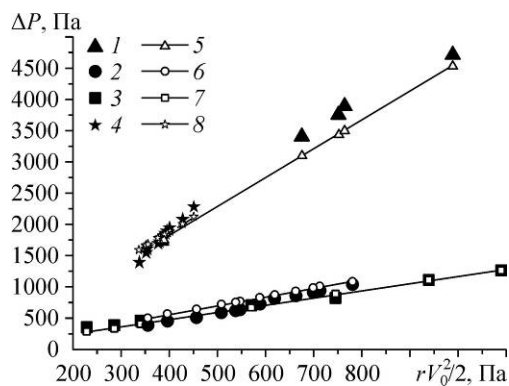
$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \frac{V_\varphi^2}{r}, \quad (3)$$

где $V_\varphi = \alpha_1 V_0 R_0 \cos \varphi / r$. Интегрируя уравнение (3) от R_0 до радиуса выхлопного отверстия r_0 , определим перепад давления на участке от боковой стенки до радиуса выхлопного отверстия:

$$\Delta P_2 = \frac{\rho V_0^2}{2} (\alpha_1 \cos \varphi)^2 \left[\left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4)$$

Рис. 7. Сопротивление на цилиндрической камере В при различных диаметрах выхлопного отверстия и на конической камере А.

Эксперимент: $d = 20$ (1), 56 (2), 76 (3) мм, коническая камера (4); расчет: $d = 20$ (5), 56 (6), 76 (7) мм, коническая камера (8).



Принимая в зоне, ограниченной радиусом выхлопного отверстия, вращение потока по закону твердого тела $V_\varphi = \omega r$ и учитывая, что на границе зоны постоянной циркуляции и зоны вращения по закону твердого тела скорость вращения не имеет разрыва, можно записать: $\omega = \frac{\alpha_1 V_0 R_0 \cos \varphi}{r_0^2}$, а $V_\varphi = \frac{\alpha_1 V_0 R_0 \cos \varphi}{r_0^2} r$. Тогда, интегрируя уравнение (3) от r_0 до нуля, запишем:

$$\Delta P_3 = \frac{\rho V_0^2}{2} (\alpha_1 \cos \varphi)^2 \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2. \quad (5)$$

Суммируя по формуле (1) полученные составляющие потери давления, приходим к формуле

$$\Delta P = \frac{\rho V_0^2}{2} \left[1 + \alpha_1^2 \cos^2 \varphi \left(2 \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2 - 1 \right) \right]. \quad (6)$$

В расчетах принималось: для конической камеры $\alpha_1 = 0,38$, для цилиндрической $\alpha_1 = 0,32$, параметр определялся на основании анализа экспериментальных данных по тангенциальной скорости газа при наличии и отсутствии слоя частиц в камере.

Выводы

Проведенные исследования показали, что сочетание воздействия центробежных сил и сил тяжести на псевдооживленный слой дисперсного материала в вихревой камере приводит к увеличению стабильности слоя при сохранении высокой скорости обтекания частиц в вихревых камерах с коническим и торцевым завихрителями. Предложена простая модель, позволяющая адекватно оценивать гидравлические потери в вихревой камере с центробежным псевдооживленным слоем.

Список литературы

1. Nakamura H., Kondo T., Watano S. Improvement of particle mixing and fluidization quality in rotating // Chemical Engng Sci. 2013. Vol. 91. P. 70–78.
2. Soria-Verdugo A., García-Hernandoa N., Almendros-Ibáñez J.A., Ruiz-Rivas U. Motion of a large object in a bubbling fluidized bed with a rotating distributor // Chemical Engng and Processing. 2011. Vol. 50. P. 859–868.
3. Волчков Э.П., Кайданик А.Н., Терехов В.И., Ядыкин А.Н. Аэродинамика и теплообмен в вихревой камере с центробежным псевдооживленным слоем частиц // ТОХТ. 1993. Т. 27, № 3. С. 258–264.
4. 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 // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 4. С. 786–796.
5. Маренок В.М., Слабинский В.И. Вихревой псевдооживленный слой и его практическое применение // Физика аэродисперсных систем. 2004. Вып. 41. С. 86–91.
6. Mohideen M.F., Raghavan V.R. Experimental studies on a swirling fluidized bed with annular distributor // J. Appl. Sci. 2011. Vol. 11, No. 11. P. 1980–1986.
7. 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, No. 8. P. 2029–2044.
8. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука, 1992. 301 с.
9. Титков В.И., Лукашов В.В. Оценка параметров турбулентных течений с помощью следающего фильтра комплексной огибающей доплеровского сигнала // Optoelectronic, instrumentation and data processing. 2006. Vol. 42, No. 1. P. 100–108.
10. Volchkov E.P., Dvornikov N.A., Lebedev V.P., Lukashov V.V. The investigation of vortex chamber aerodynamics // Proc. Third Russian Korean Intern. Symp. on Sci. and Technology, KORUS99, June 1999, Novosibirsk, Russia, 1999. Vol. 1. P. 40–43.
11. Волчков Э.П., Дворников Н.А., Абдрахманов Р.Х. Исследование аэродинамики вихревой камеры // Тр. 4-й Росс. нац. конф. по теплообмену. М.: МЭИ, 2006. Т. 6. С. 178–181.

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2013 г.