

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

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

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia

Введение

Псевдооживленные слои находят широкое применение в тепломассообменных процессах [1]. В отличие от псевдооживления в поле сил тяжести, в вихревых камерах с центробежным кипящим слоем зернистого материала как правило, не происходит образования газовых пузырей, может быть на порядок увеличена скорость обтекания частиц газовым потоком [2]. Применение центробежного кипящего слоя позволяет существенно повысить интенсивность тепло и массообмена. Для организации слоя частиц могут быть использованы различные типы вихревых камер. Одним из важных конструктивных факторов, определяющих характеристики течения, является угол раскрытия образующей щелевого завихрителя. В данной работе рассматривались три варианта организации потока (Рис.1.) с углом в 0, 45 и 90 градусов относительно геометрической оси камеры. Исследовался случай однофазного потока и течение в камере центробежным псевдооживленным слое дисперсного материала, (в том числе при горении пропан-бутана).

Эксперименты в конической ВК, схематично показанной на Рис.1А, так же как и в случае камеры «В», выявили высокую стабильность центробежного псевдооживленного слоя. При использовании частиц диаметром 1...3 мм формируется устойчивый слой, отсутствует неконтролируемый вынос и истирание зернистого материала в течение длительного времени. В цилиндрической же камере типа «Б» тех же габаритов критический вынос частиц из слоя и его разрушение происходило за 10...15 мин. В конической камере «А» был реализован процесс беспламенного окисления пропан-бутана в воздухе во вращающемся слое катализатора. Уровень NO в выходящих газах в этом случае не превышал 20 ppm.

Расчетное распределение концентрации твёрдой фазы в вихревой камере типа «В» (показано на Рис.1.-В) удовлетворительно согласуется с визуальными наблюдениями за движением частиц слоя в камере «В». Частицы слоя двигались вдоль цилиндрической поверхности камеры, под углом примерно 30-40 градусов, по отношению к торцу камеры, достигали верхней точки слоя и затем опускались к основанию слоя. Неконтролируемый вынос частиц из слоя не превышал 7% от начальной массы за время эксперимента (3 часа). В ходе экспериментов было обнаружено, что слой частиц в камере «В» остаётся 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 завихрителя («Б»).

При горении внутри камеры «Б», величина тангенциальной компоненты увеличивается, при этом положение максимума смещается к оси камеры. Уровень турбулентности при горении возрастает на периферии камеры в ~2 раза. Вблизи геометрической оси уровень пульсаций сохраняется таким же, как и в изотермическом потоке. Оказалось, что при организации горения в вихревой камере устойчивый слой дисперсной фазы формируется при более низких (в 1.5...2 раза) расходах газа по сравнению с изотермическим случаем.

Измерения распределений окружной и осевой компонент скорости проводились с помощью двух-компонентного лазерного доплеровского анемометра в потоке воздуха в сечении, расположенном над вращающимся слоем частиц. Особенности работы аппаратуры описаны в [3]. В качестве светорассеивающих центров использовались частички Al_2O_3 .

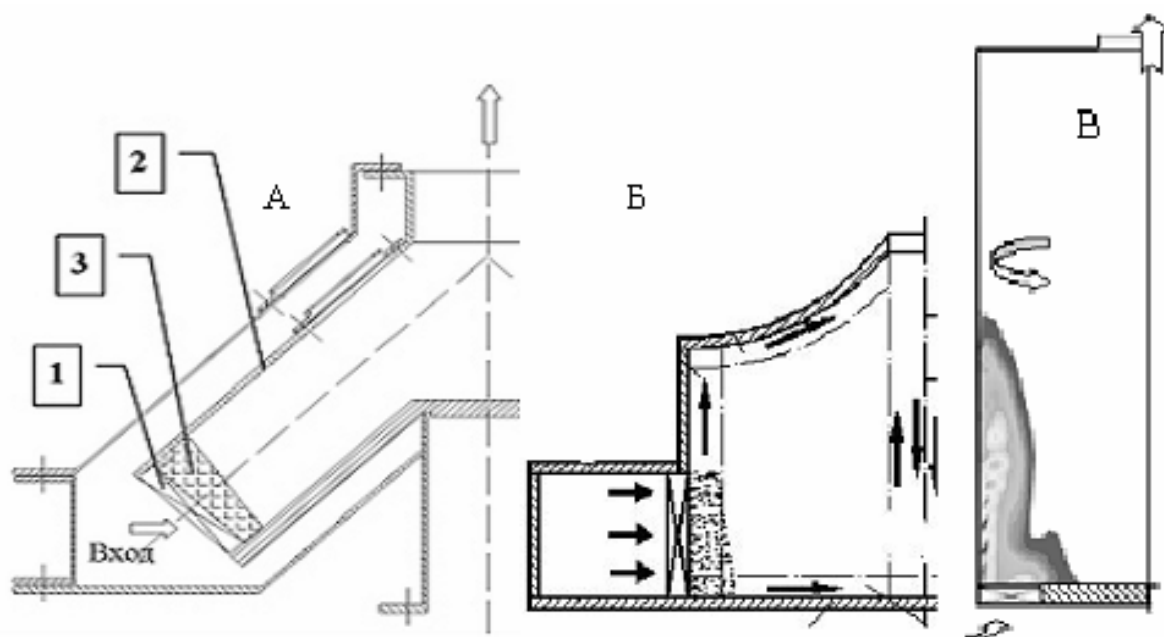


Рис.1. Рассмотренные типы вихревых камер с центробежным псевдооживленным слоем. А- коническая ВК, $R_K=174\text{mm}$, $d=60\text{ mm}$; Б-цилиндрическая ВК с боковым щелевым завихрителем $R_K=100\text{mm}$, $d=60\text{ mm}$, $L=100\text{mm}$, В-цилиндрическая ВК с торцевым завихрителем, $R_K=50\text{mm}$, $L=150\text{ mm}$. 1-щелевой завихритель, 2- слой частиц, 2- корпус камеры.

Расчеты удержания зернистого слоя в вихревой камере выполнялись по Эйлеровой модели взаимопроникающих жидкостей. Уравнение неразрывности для каждой из фаз при отсутствии массообмена между фазами

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

Уравнение количества движения

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

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 аналогично, как и в лагранжевых моделях движения твердой фазы в потоке газа.

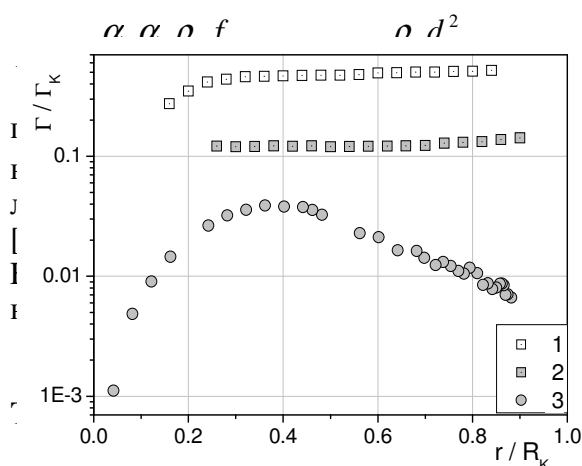


Рис. 2. Безразмерный момент количества движения потока в цилиндрической ВК. 1- Б, однофазное течение; 2- Б, масса частиц 50 г; 3- камера В, масса частиц 140 г, $d=20\text{ mm}$.

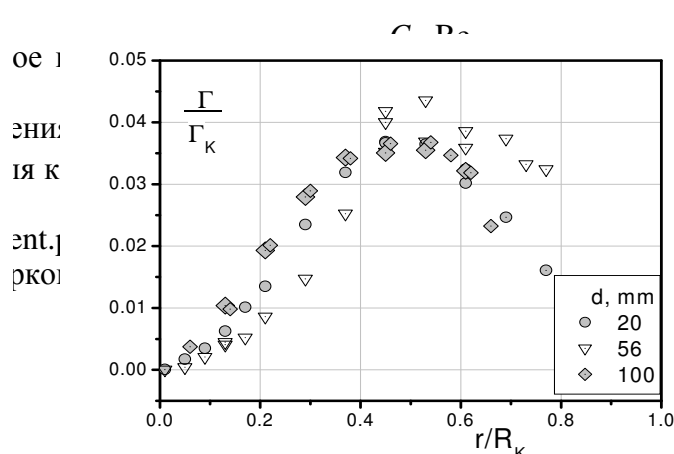


Рис.3. Распределение безразмерной циркуляции в вихревой камере В - с торцевым завихрителем. Масса частиц слоя – 100 г, массовый расход воздуха 24 г/с.

Наличие слоя частиц в вихревой камере приводит к снижению величины момента количества движения (Рис.2.). Характер распределения безразмерной циркуляции (отнесённой на его значение при $r = R_K$) в ВК с торцевым завихрителем (В) отличен от закономерностей ВК с боковым цилиндрическим завихрителем (Б). В камере с боковым цилиндрическим завихрителем момент количества движения в области $0.2 < r/R_K < 0.9$ остаётся практически постоянным. При использовании торцевого завихрителя (В) безразмерная циркуляция изменяется по радиусу с наличием максимума циркуляции в области, удаленной от боковой стенки. Возможно, это связано с тем, что, течение в камере Б с цилиндрическим завихрителем является непроточным в радиальном направлении, т.е., основная часть потока, вошедшая в ВК, движется к оси камеры не по всей её высоте, а только через тонкие пристенные области, примыкающие к торцевым поверхностям. Изменение диаметра выходного отверстия вихревой камеры с торцевым завихрителем от $d=20$ mm до $d=100$ mm слабо меняет распределения циркуляции по радиусу (Рис.3.). Изменения, по-видимому, связаны тем, что в этом режиме, как видно из данных представленных на Рис.4., в приосевой области существует область возвратного течения.

На рис. 5. представлены радиальные профили тангенциальной скорости, газа при наличии частиц в камере «В», измеренный экспериментально с помощью ЛДИС и рассчитанный по $k-\varepsilon$ модели в сечении на расстоянии 66 мм от нижнего торца камеры. Учитывая, что дисперсная фаза на порядок снижает тангенциальную скорость газового потока, соответствие расчета и эксперимента удовлетворительное. В случае однофазного потока использовалась модифицированная $k-\varepsilon$ модель тур-

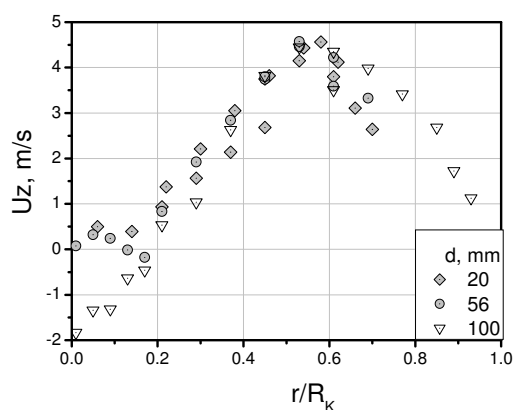


Рис.4. Распределения осевой компоненты скорости в вихревой камере «В».

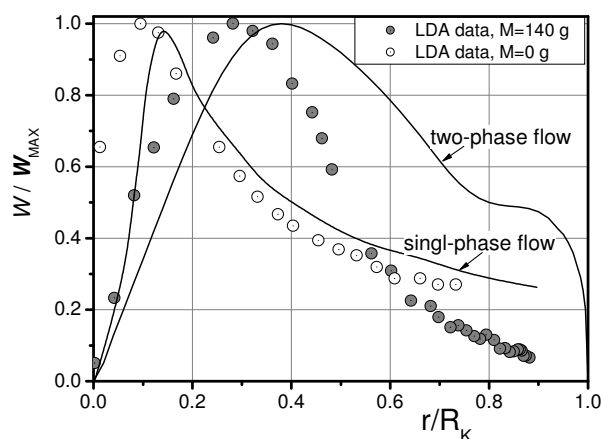


Рис.5. Тангенциальная скорость газа камера «В». $d=20$ mm. Линии- расчёт: $k-\varepsilon$ модель турбулентно-

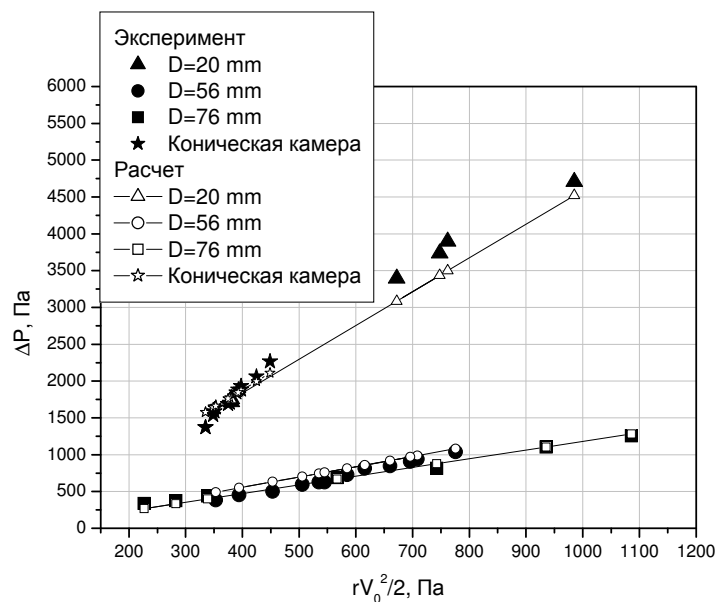


Рис.6. Сопротивление на цилиндрической камере типа «В» при различных диаметрах выходного отверстия и на конической камере типа «А».

булентности, учитывающая влияние массовых сил на турбулентность [4], которая позволяет получить несколько лучшее соответствие экспериментальным данным, чем стандартная модель, использованная при расчете двухфазного течения.

Гидравлическое сопротивление вихревой камеры

Важной характеристикой тепло-массообменного аппарата является зависимость потерь давления от расхода газа, проходящего через него. В наших опытах потери давления

проводились путём измерения разности давления между окружающей атмосферой и избыточным давлением перед завихрителем. Результаты измерений и расчетов по формулам, полученным ниже приведены на Рис.6. Линиями нанесен расчет. Как видно из представленных данных в камерах различного типа зависимость перепада давления от $\rho V_0^2 / 2$ скоростного напора воздуха в щелях закручивающего аппарата 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:

$$\Delta P_1 = \frac{\rho(\alpha_2 V_0)^2}{2} \quad (2)$$

Здесь V_0 – полная средняя скорость в щелях, α_2 – коэффициент неравномерности скорости в щелях (отношение максимальной скорости в щели к среднерасходной). 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 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 $V_\varphi = \alpha_1 \alpha_2 V_0 R_0 \cos \varphi / r$. Отсюда, интегрируя уравнение (3) от R_0 , до радиуса выхлопного отверстия r_0 , определим перепад давления на участке от боковой стенки до радиуса выхлопного отверстия

$$\Delta P_2 = \frac{\rho(\alpha_2 V_0)^2}{2} * (\alpha_1 \alpha_2 \cos \varphi)^2 \left[\left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \quad (4)$$

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

$$\omega = \frac{\alpha_1 \alpha_2 V_0 R_0 \cos \varphi}{r_0^2}, \text{ а } V_\varphi = \frac{\alpha_1 \alpha_2 V_0 R_0 \cos \varphi}{r_0^2} * r$$

Тогда интегрируя уравнение (3) от r_0 до нуля получим

$$\Delta P_3 = \frac{\rho(\alpha_2 V_0)^2}{2} * (\alpha_1 \alpha_2 \cos \varphi)^2 \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2 \quad (5)$$

Суммируя по формуле (1) полученные составляющие потери давления, получим формулу

$$\Delta P = \frac{\rho \alpha_2^2 V_0^2}{2} \left[1 + \alpha_1^2 \cos^2 \varphi \left(2 \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2 - 1 \right) \right] \quad (6)$$

В расчетах принималось для конической камеры $\alpha_1 = 0.38$, для цилиндрической $\alpha_1 = 0.32$, неравномерность профилей скорости в щелях в первом приближении не учитывалась, $\alpha_2 = 1$.

Выводы

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.

Acknowledgments

The authors are very thankful for the financial support of the work by Russian President grant No НШ-6965.2006.8.

REFERENCES

1. Дж.Боттерил Теплообмен в псевдооживленном слое, М.: Энергия, 1990.
2. Волчков Э.П., Кайданик А.Н., Терехов В.И., Ядыкин А.Н. // ТОХТ.- 1993.- 27(3).- С.258- 264.
3. Титков В.И., Лукашов В.В. Оценка параметров турбулентных течений с помощью следящего фильтра комплексной огибающей доплеровского сигнала // Optoelectronic, instrumentation and data processing. 2006. Vol.42, No. 1. P. 100-108.
4. E.P. Volchkov, N.A. Dvornikov, V.P. Lebedev, V.V.Lukashov. The investigation of vortex chamber aerodynamics. // Proceeding the third Russian Korean international symposium on science and technology, KORUS99 June 1999, Novosibirsk, Russia, vol.1, pp.40-43.