УДК 532.529

Влияние эшелонированной подачи закрученного потока воздуха на формирование слоя частиц в вихревой камере^{*}

Н.А. Дворников, В.В. Лукашов, Р.Х. Абдрахманов

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

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

На основе визуального наблюдения псевдоожиженного слоя, определения уноса дисперсного материала слоя с помощью взвешивания материала через заданное время работы вихревой камеры, а также с помощью численного моделирования динамики псевдоожиженного слоя частиц сделаны выводы о характере псевдоожижения слоя и скорости уноса полифракционного материала слоя в вихревой камере с подачей воздуха через нижний и верхний торцевые завихрители в цилиндрической вихревой камере.

Ключевые слова: вихревая камера, центробежный кипящий слой, унос частиц из камеры.

Введение

При организации вращающегося псевдоожиженного слоя частиц в вихревых камерах существенную роль играет унос частиц из камеры. Уносу способствует расслоение мелких и крупных фракций частиц в слое, образование волн на его поверхности, пузырьковый режим псевдоожижения слоя, превышение скорости протока газа сквозь слой по сравнению со скоростью витания частиц. Во многих представленных по данной теме статьях вышеперечисленным вопросам уделяется большое внимание. В работах [1–5] рассматривался псевдоожиженный слой частиц, проточный по газу и непроточный по дисперсному материалу, для которого процесс уноса и истирания частиц определяет период работы слоя, после которого требуется дозагрузка дисперсного материала в количестве унесенного за время нахождения слоя в камере. Слой в проточных по дисперсному материалу вихревых камерах [6, 7] постоянно пополняется за счет дополнительной подачи материала в камеру. В таких камерах унос мелких фракций является положительным фактором в процессе измельчения материала или очистки крупных частиц от мелких примесей. В представленной работе проведено экспериментальное исследование уноса частиц материала из слоя и выполнено численное моделирование динамики частиц и газа в вихревой камере с подачей закрученного потока воздуха через верхний и нижний торцевые завихрители вихревой камеры. Численное моделирование выполнялось с помощью пакета Fluent в модели взаимопроникающих жидкостей в эйлеровом приближении: уравнения движения приведены в работах [4, 5]. В качестве взаимопроникающих жидкостей использовался воздух с плотностью 1,2 кг/м³ и частицы песка

^{*} Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № ААА-А17-117030310010-9).

[©] Дворников Н.А., Лукашов В.В., Абдрахманов Р.Х., 2020





диаметром 1,5 и 0,3 мм с плотностью 2650 кг/м³. Песок представлял собой смесь мелкой и крупной фракций, по 25 г каждой фракции.

Экспериментальное исследование

Эксперименты по формированию и удержанию вращающегося псевдоожиженного слоя проводились в цилиндрической вихревой камере высотой 0,145 м с внутренним диаметром 0,1 м (рис. 1). Камера состоит из корпуса *1*, верхнего торца с прорезанным на его периферии щелевым завихрителем *2* и нижнего торца с прорезанным на периферии торцевым завихрителем *3*. В ряде опытов внутри камеры размещалась коническая вставка *4* с целью отсечь нижнюю зону камеры от верхнего вихря, создаваемого верхним завихрителем.

Дисперсный материал из песка классифицировался по размерам на ситах с размерами ячеек 0,25 и 0,4 мм (средний размер частиц 0,3 мм), 1,25 и 2 мм (средний размер частиц 1,5 мм), после чего фракции раздельно взвешивались и формировалась засыпка требуемой массы и состава. Взвешивание выполнялось на электронных лабораторных весах 4-го класса ВЛЭ-1кг с погрешностью ±60 мг. В качестве ожижающего агента использовался осушенный воздух. Сжатый воздух вводился из магистрали в вихревую камеру с помощью расходомерной станции. Массовый расход воздуха через нижний завихритель контролировался с помощью расходомерной шайбы, перепад давления на ней измерялся дифференциальным датчиком давления DPS+ 808-0060. Расход воздуха через верхний завихритель измерялся с помощью поплавкового ротаметра. В процессе эксперимента в вихревую камеру помещался дисперсный материал, после чего через нижний завихритель подавался расход, затем вводился воздух через верхний завихритель. Давление в потоке газа было близко атмосферному, скорости газа — существенно дозвуковые. В связи с этим фиксировался только расход газа через верхний и нижний завихрители и вычислялись скорости газа в тангенциальном и аксиальном направлениях на выходе из завихрителей, давление при определении плотности воздуха на выходе из щелей принималось атмосферным, температура — комнатной. Через фиксированный интервал времени подача воздуха прекращалась и проводилось контрольное взвешивание дисперсного материала.

В первой серии опытов цилиндрическая камера была снабжена двумя завихрителями: один располагался на нижнем торце камеры для подачи закрученного потока газа в слой частиц, другой — на верхнем торце камеры для подачи газа в надслоевое пространство. Коническая вставка в камере отсутствовала. Верхний поток организовывался для усиления закрутки потока над слоем и соответственно увеличения сепарации выносимых из камеры частиц с целью их возврата в слой. Однако эксперименты привели к парадоксальному результату — вынос частиц из слоя увеличился. Визуально определялось, что интенсивный вихрь над слоем приводил к образованию волн на границе слоя с вихрем, вплоть до разрушения слоя.

С целью уменьшения уноса частиц авторами была несколько модифицирована эта же цилиндрическая камера с установленными верхним и нижним завихрителями: для недопущения воздействия верхнего интенсивного вихря на слой дополнительно вверху

Таблица

паражетры те тепня терез пижний завихритень и масса сноя в вихревой кажере				
Номер эксперимента	Расход воздуха через нижний завихритель, г/с	Масса слоя, г	Аксиальная скорость на нижнем завихрителе, м/с	Тангенциальная скорость на нижнем завихрителе, м/с
1	17	50	9,34	32,6
2	8,7	50	4,78	16,7

Параметры течения через нижний завихритель и масса слоя в вихревой камере

камеры была установлена коническая вставка (4 на рис. 1). Благодаря этому унос частиц и разрушение слоя были значительно уменьшены по сравнению со случаем отсутствия конической вставки. Формирование слоя частиц в камере с конической вставкой стало предметом экспериментального исследования и численного моделирования настоящей работы. Скорости витания частиц оценивались по формуле (1), которая была предложена в работе [8]:

$$\operatorname{Re} = \operatorname{Ar} / (18 + 0.6\sqrt{\operatorname{Ar}}), \tag{1}$$

где Ar = $g d^3 \rho (\rho_p - \rho) / \mu^2$ — число Архимеда, Re = $\rho dV / \mu$ — число Рейнольдса, построенное по скорости витания частиц в поле силы тяжести. Скорость витания по формуле (1) для мелких частиц диаметром 0,3 мм составила ~ 2,7 м/с, для крупных частиц диаметром 1,5 мм — ~ 9 м/с. В экспериментах и соответственно расчетах слой состоял из частиц песка диаметром 0,3 мм, весом 25 г и частиц песка диаметром 1,5 мм, весом 25 г. Плотность вещества составляла 2650 кг/м³. Эксперименты, а также расчеты проводились при подаче воздуха плотностью 1,2 кг/м³ через верхний и нижний завихрители. Значения параметров вариантов 1 и 2 эксперимента и соответственно расчетов для нижнего завихрителя и массы слоя приведены в таблице. Для верхнего завихрителя расход в экспериментах и расчетах оставался постоянным — 8 г/с, аксиальная скорость составляла 4,4 м/с, тангенциальная — 25,5 м/с.

Численное моделирование

Численное моделирование движения слоя частиц в закрученном потоке газа выполнялось по эйлеровой модели взаимопроникающих жидкостей, которая подробно описывалась в работах [4, 5]. В вариантах расчетов 1 и 2 значения параметров частиц в слое и параметров потока газа совпадают со значениями параметров экспериментов 1 и 2. Из приведенных в таблице данных аксиальной скорости на выходе из нижнего завихрителя и оценке скорости витания частиц (1) следует, что только в первом опыте скорость витания крупных частиц была меньше аксиальной компоненты скорости потока на выходе из завихрителя. При этом скорость витания мелких частиц песка была меньше выходной аксиальной компоненты скорости потока из нижнего завихрителя во всех рассмотренных случаях. Следует отметить, что аксиальная компонента скорости потока быстро падает по высоте камеры и становится меньше, чем скорость витания мелких частиц, даже в случае варианта 1, когда расход через нижний завихритель является максимальным. На рис. 2 показано поле аксиальной компоненты скорости газового потока для варианта 1 через 0,6 с после запуска течения, а на рис. 3 — поле тангенциальной компоненты скорости газового потока для этого же случая. Из рис. 2 видно, что даже при максимальном расходе воздуха через нижний завихритель аксиальная компонента скорости потока воздуха в пристенной области боковой стенки быстро падает по высоте и становится меньше скорости витания мелких частиц. Из рис. З видно, что и тангенциальная компонента скорости газового потока быстро падает, проходя сквозь слой частиц. Большая величина тангенциальной компоненты скорости газового потока наблюдается только вблизи выхода из нижнего щелевого завихрителя, а также выше конуса, ограничивающего вихревой поток от верхнего завихрителя.

Дворников Н.А., Лукашов В.В., Абдрахманов Р.Х.



Рис. 2. Поле аксиальной скорости (м/с) газового потока для варианта 1 через 0,6 с с начала подачи воздуха.

Рис. 3. Поле тангенциальной скорости (м/с) газового потока для варианта 1 через 0,6 с с начала подачи воздуха.





Рис. 4. Поле объемной концентрации частиц песка диаметром 0,3 мм для варианта 1 в различные моменты времени с начала подачи воздуха. $\tau = 0,6 (a), 2,85 (b), 7 (c).$

Теплофизика и аэромеханика, 2020, том 27, № 5



Рис. 5. Поле объемной концентрации частиц песка диаметром 1,5 мм для варианта 1 в различные моменты времени с начала подачи воздуха. Обозначения см. на рис. 4.

в случае варианта 1 выносятся наверх камеры, причем крупные частично остаются в нижней части камеры. А через 7 с после начала подачи газа и мелкие и крупные частицы опять возвращаются в нижнюю часть камеры. При дальнейшем расчете колебательные движения частиц вверх и вниз камеры повторяются.

Совсем другая ситуация наблюдается для варианта 2, когда аксиальная компонента скорости газового потока из нижнего завихрителя намного меньше скорости витания крупных частиц. А так как аксиальная компонента скорости газового потока по высоте камеры быстро падает, она становится меньше скорости витания и для мелких частиц.



Рис. 6. Поле объемной концентрации частиц песка диаметром 0,3 мм для варианта 2 в различные моменты времени с начала подачи воздуха. Обозначения см. на рис. 4.



Рис. 7. Поле объемной концентрации частиц песка диаметром 1,5 мм для варианта 2 в различные моменты времени с начала подачи воздуха. Обозначения см. на рис. 4.

Поля объемной концентрации мелких (рис. 6) и крупных (рис. 7) частиц близки по форме для всех рассмотренных периодов времени: слой остается в области нижнего торца камеры.

Следует отметить, что скорость уноса частиц из камеры является достаточно низкой, порядка одной десятитысячной от массы слоя в секунду даже для варианта 1, когда частицы периодически отрываются от нижнего торца и приближаются к конической вставке. Визуально в эксперименте в первом варианте наблюдается хаотическое движение массы частиц в камере без образования слоя. Во втором варианте наблюдается сформированный вращающийся псевдоожиженный слой.

На рис. 8 показана скорость уноса частиц из слоя как отношение массы слоя M к первоначальной массе слоя M_0 в зависимости от отношения расходов воздуха через верхний завихритель G_1 к расходу через нижний завихритель G_2 . Следует учесть, что расход газа через верхний завихритель не является столь значимым параметром, как расход газа через нижний завихритель и скорость витания для частиц.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Увеличение тангенциальной компоненты скорости потока газа над слоем частиц с помощью верхнего завихрителя приводит к быстрому разрушению этого слоя.

 Установка конической вставки в верхней части камеры приводит к устранению разрушающего воздействия верхнего вихревого потока на псевдоожиженный слой частиц.

3. Из приведенных данных следует, что в цилиндрической камере с подачей закрученного

Рис. 8. Скорость относительного изменения массы слоя (1/с) в зависимости от отношения расхода через верхний завихритель к расходу через нижний завихритель. 1 — эксперимент, 2 — расчет.



потока газа через нижний завихритель вынос частиц заметно увеличивается при превышении аксиальной компоненты скорости газа из завихрителя над величиной скорости витания частиц. Однако даже в этом случае частицы сразу не уносятся, а совершают периодические движения вверх из зоны, где скорость газа в вертикальном направлении больше скорости витания, и затем вниз из зоны, где скорость газа в вертикальном направлении становится меньше скорости витания частиц.

Список литературы

- 1. Niyogi K., Torregrosa M.M., Pantzali M.N., Heynderickx G.J., Marin G.B. Experimentally validated numerical study of gas-solid vortex unit hydrodynamics // Powder Technology. 2017. Vol. 305. P. 794–808.
- De Wilde J. Gas-solid fluidized beds in vortex chambers // Chem. Eng. Process: Process Intensif. 2014. Vol. 85. P. 256–290.
- **3. 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.
- 4. Абдрахманов Р.Х., Дворников Н.А., Лукашов В.В. Динамика двухфазного закрученного потока в вихревой камере с нижним торцевым завихрителем // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 3. С. 349–356.
- 5. Волчков Э.П., Дворников Н.А., Лукашов В.В., Абдрахманов 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.
- 6. Дворников Н.А., Белоусов П.П. Исследование псевдоожиженного слоя в вихревой камере // Прикл. механика и техн. физика. 2011. Т. 52, № 2. С. 59–65.
- 7. Пат. RU 2 619 905 C1 РФ, МПК⁽⁵¹⁾ В02C 21/00. Мельница-сушилка для дробления, селективного помола и сушки полиминеральных отходов / Стороженко Г.И., Дворников Н.А., Чивелев В.Д.; заявитель и патентообладатель ИТ СО РАН. № 2016125613; заявл. 27.06.2016; опубл. 19.05.2017, Бюл. № 14.
- 8. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Ленинград: Химия, 1968. 512 с.

Статья поступила в редакцию 24 сентября 2019 г., после доработки — 23 января 2020 г., принята к публикации 28 апреля 2020 г.