

УДК 66.011

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
ВИХРЕВЫХ АППАРАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ**

**HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS AND THE SCOPE
OF VARIOUS TYPES OF VORTEX APPARATUS**

Б.С. САЖИН, М.Б. САЖИНА, М.А. АПАРУШКИНА, З.Н. ОСМАНОВ, Э.Р. КУШПАНОВ, В.В. ПЕСКОВОЙ
B.S. SAZHIN, M.B. SAZHINA, M.A. APARUSHKINA, Z.N. OSMANOV, E.R. KUSHPANOV, V.V. PESKOVOY
(Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского,
Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)
(Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky;
Moscow State Textile University "A.N. Kosygin")
E-mail: paxt@ya.ru

Рассмотрены особенности гидродинамики дисковых вихревых аппаратов, пылеуловителей со встречными закрученными потоками, и вихревых труб с термодинамическим разделением потоков. Отмечены их достоинства, недостатки и рациональная область применения, в том числе в производстве волокнообразующих полимеров.

The features of hydrodynamics of disk vortex devices, dust collectors with counter swirling flows and vortex tubes with thermodynamic flows separation have been considered. Their advantages, disadvantages and rational scope including manufacture of fiber-forming polymers have been noted.

Ключевые слова: гидродинамика, вихревой режим, вихревые аппараты, дисковые вихревые сушилки, удерживающая способность, встречные закрученные потоки, вихревые пылеуловители, критические скорости, докритическая область, разделительная способность, тепломассообменные процессы, сушка, эффективность, гидравлическое сопротивление, термодинамическое распределение потоков, эффект Ранка-Хилша, вихревые трубы.

Keywords: hydrodynamics, a vortex mode, vortex machines, disk vortex dryers, retention capacity, counter-swirling flows, vortex dust collectors, critical velocity, subcritical field, separation capacity, heat-mass exchange processes, drying, efficiency, pressure drop, thermodynamic of flows distribution, Ranque-Hilsch effect, vortex tubes.

К типичным вихревым режимам обычно относят три типа гидродинамических режимов взвешенного слоя: режим оди-

ночного закрученного потока, образующего вихревой слой в дисковых вихревых аппаратах (ВС), режим встречных закручен-

ных потоков (ВЗП) и режим закрученных потоков с температурным разделением, реализуемым за счет эффекта Ранка-Хилша [1], [2], [4].

Режим в дисковых вихревых аппаратах отличается наличием двух типов выноса продукта из аппарата: при малых (докритических) скоростях – за счет выпадения частиц из закрученного потока под действием силы тяжести, при больших скоростях (больше критических) – за счет выноса из боковой части аппарата потоком газа.

Важнейшей характеристикой дисковых вихревых камер является удерживающая способность q (количество материала в аппарате), определяющая производительность аппарат G и продолжительность обработки материала в аппарате τ при закрепленной производительности, что иллюстрируется известной формулой [2]:

$$q = \frac{G}{\tau}. \quad (1)$$

В докритической области скоростей удерживающая способность q не зависит от характеристики материала и определяется величиной скорости (расхода) газа, а при скоростях, больших критической q , наоборот, не зависит от расхода газа, но зависит от характеристики обрабатываемого дисперсного материала (плотности, размера частиц), что установлено теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Дисковые вихревые аппараты являются эффективными для сушки дисперсных материалов с размерами пор до 4,0 нм, что подтверждено рядом исследований [1...3].

Аппараты со встречными закрученными потоками изучались как у нас, так и за рубежом. Они отличаются очень высокой разделяющей способностью и поэтому основная область их применения – пылеулавливание. Наиболее известны пылеуловители ВПУ, разработанные за рубежом, и пылеуловители типа ВЗП отечественной разработки.

Отечественные аппараты типа ВЗП конструкции МГТУ им. А.Н. Косыгина имеют ряд важных преимуществ перед за-

рубежными пылеуловителями ВПУ: при одинаковой разделительной способности они при равных габаритах аппаратов имеют в 3 раза большую производительность за счет того, что при двухканальной подаче газа, по обоим каналам подается рабочая пылегазовая смесь, в то время как в пылеуловителях ВПУ пылегазовая смесь (около 30% общего расхода газа) подается только по нижнему (внутреннему) каналу, а по наружному (верхнему) каналу во избежание пылеуноса подается чистый газ.

Вторым важным преимуществом аппарата ВЗП является малый расход энергии по сравнению с аппаратами ВПУ, так как в схеме пылеуловителей ВПУ предусмотрена подача газа компрессором через систему сопел с большим гидравлическим сопротивлением (сопловая система предназначена для предотвращения выноса пыли из верхней части аппарата, что, как было установлено нашими исследованиями [1], [2], является неоправданной перестраховкой). Кроме того, в зарубежных аппаратах ВПУ установлены на "хвосте" и в "головной части" вентиляторы высокого давления, в то время как в аппаратах ВЗП все тягодутьевое оборудование состоит из одного "хвостового" вентилятора среднего давления, потому что сопротивление аппаратов ВЗП в несколько раз меньше, чем аппаратов ВПУ.

В результате значительных преимуществ аппаратов ВЗП они получили очень широкое применение (разработан ряд конструкций применительно к разным технологическим задачам, изготовлено и внедрено несколько тысяч аппаратов в различных отраслях промышленности). При этом аппараты ВЗП используются в технологических процессах не только в качестве пылеуловителей, но и в качестве эффективных аппаратов для проведения теплообменных процессов, например, процессов сушки [1], [2].

Вопрос эффективности применения вихревых пылеуловителей в теплоэнергетических установках был рассмотрен в работе [3]. Установлена эффективность применения вихревых пылеуловителей ВЗП в качестве воздухоочистительного устройст-

ва теплоэнергетических установок турбинного типа.

Показано, что коэффициент гидравлического сопротивления ВЗП может быть вычислен по двум параметрам – кратности расхода K^* (по каналам) и коэффициенту гидравлического сопротивления ξ^* , которые связаны соотношением

$$\xi^* = \xi_1(1 - K^*)^2. \quad (2)$$

Получено соотношение между коэффициентом гидравлического сопротивления каналов первичного и вторичного потоков и кратностью расхода K^* в виде уравнения:

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{K^{*2}}{(1 - K^*)^2}. \quad (3)$$

Эффективность пылеуловителя имеет логарифмически нормальное распределение и определяется из выражения:

$$\eta_0 = (1 - K)\eta_1\eta_2, \quad (4)$$

где η_1 и η_2 – фракционные коэффициенты очистки газа, поступающего по первому и второму каналу, которые могут быть определены из выражения:

$$\eta_{1,2} = \sum_{i=1}^N \Phi_i(x_{1,2})\eta_{1,2}, \quad (5)$$

где
$$\Phi_{1,2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{x_{1,2}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (6)$$

– интеграл вероятности.

Значение $\Phi(x)$ может быть определено полиномом второй степени.

Зависимость характеристик эффективности вихревого пылеулавливания и улавливаемой пыли определяется выражением:

$$x_{1,2} = \lg \frac{\delta_m}{\delta_{1,2\eta=50}} / \sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_{1,2\eta=50}}, \quad (7)$$

где δ_m – размер улавливаемых частиц; $\sigma_{1,2\eta=50}$ и $\sigma_{1,2\eta}$ – параметры кривой фракционной эффективности.

Параметр $\sigma_{1,2\eta}$ слабо зависит от кратности расхода и может быть принят постоянной величиной. Параметры $\sigma_{1,2\eta=50}$ зависят от кратности расхода и могут быть определены из формул:

$$\delta_{1\eta=50} = \delta_{1\eta=50}^* \sqrt{1 - K^* / 1 - K}, \quad (8)$$

$$\delta_{2\eta=50} = \delta_{2,1\eta=50}^* \sqrt{\frac{K^*}{K}}, \quad (9)$$

где $\delta_{1,2\eta=50}$ – опытные значения при заданной степени кратности K^* (соотношения потоков по каналам).

Вихревые аппараты, использующие эффект Ранка – Хилша, принципиально отличаются от двух рассмотренных типов вихревых аппаратов, относящихся к аппаратам со взвешенным слоем материала, хотя в них так же, как и в аппаратах ВЗП, используется два взаимодействующих закрученных потока. Их часто называют вихревыми трубами (ВТ).

В аппаратах ВТ происходит термодинамическое разделение потоков на горячий и холодный. Они нашли применение для небольшой производительности главным образом в криогенных процессах, хотя имеются предложения по их использованию и в других процессах, в том числе промышленных масштабов. Так еще в 70-е годы прошлого столетия были запатентованы ВТ в качестве сушилок (авторы патента Б.С. Сажин и В.Б. Сажин). В последние годы появились исследования по использованию ВТ в качестве теплообменников с одновременным улавливанием пыли из пылегазовых смесей [4]. Проведены исследования, согласно которым ВТ низкого напора могут быть многоцелевыми аппаратами (подобно ВЗП) и выполнять дополнительные функции пылеуловителя и осушителя газового потока [4]. Однако вывод о том, что при этом термодинамическая эффективность не меняется, представляется недостаточно убедительным. В той же работе [4] на основе проведенных исследований сделан вывод, что вихревой водокольцевой компрессор мо-

жет выполнять дополнительную функцию пылеуловителя без изменения эксплуатационных характеристик и применяться в качестве "мокрой" ступени газоочистки; разработана комбинированная система очистки воздуха от пыли циклон-вихревой компрессор и предложена методика ее гидравлического расчета.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены основные типы вихревых аппаратов, проанализированы особенности их гидродинамики и определены области их рационального применения.

2. Показано, что дисковые вихревые аппараты имеют две области гидродинамических режимов: область малых (докритических) скоростей газа и область повышенных (закритических) скоростей, в которой наблюдается независимость удерживающей способности аппарата от расхода газа, что обуславливает целесообразность применения дисковых вихревых аппаратов в качестве сушилок для тонкопористых дисперсных материалов.

3. Проведен сравнительный анализ отечественных и зарубежных вихревых аппаратов со встречными закрученными потоками. Показаны преимущества отечественных аппаратов ВЗП по сравнению с зарубежными аппаратами ВПУ по эффективности и экономичности. Отмечена возможность применения аппаратов ВЗП как

в качестве пылеуловителя, так и в качестве многофункционального аппарата.

4. Отмечена эффективность применения аппаратов ВЗП в теплоэнергетических турбинных установках и приведены некоторые результаты по гидродинамике ВЗП, полученные в соответствующих работах.

5. Приведены примеры использования вихревых труб, основанных на эффекте Ранка-Хилша, в различных технологических процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы термовлажностной обработки дисперсных и рулонных материалов. – М.: Химия, 2012.
2. Сажин В.Б., Сажина М.Б. Выбор и расчет аппаратов со взвешенным слоем. – М.: РосЗИТЛП, 2001.
3. Сажин Б.С., Козлякова О.В. и др. Учет флуктуаций пыли в аппаратах ВЗП при комплексной промышленной эксплуатации энерготурбинных установок. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001.
4. // Успехи в химии и химической технологии, 2003, Т17, №1 (26). С. 111...115.
5. Тарасова Л.А. Повышение эффективности технологических процессов, связанных с приданием аппаратам вихревого типа дополнительных функций: Дис....докт. техн. наук. – М., 2009.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности МГТУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 06.12.12.