

Питак И. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОБРАЗЦА РОТОРНОГО ВИХРЕВОГО АППАРАТА

Описаны параметры, характеризующие условия эксплуатации опытно-промышленной установки. Представлено экспериментальное исследование состава газообразных компонентов и эффективности их очистки. Проведена сравнительная характеристика аппаратов мокрой очистки газов от пыли. Установлено, что аппараты достигают максимальной эффективности очистки, но с различной затратой электроэнергии.

Ключевые слова: очистка, роторный вихревой аппарат, пыль, газ, эффективность, затраты энергии.

1. Введение

Общей тенденцией развития химической и смежных отраслей промышленности является увеличение количества производств средней и малой мощности, которое обусловлено необходимостью расширения ассортиментов выпускаемой продукции, созданием производств, чаще всего мобильных, которые осуществляют переработку промышленных отходов. С другой стороны, следует отметить ужесточение экологических требований к химическим производствам [1].

В этих условиях основными требованиями к оборудованию для очистки газов есть следующие: высокая эффективность, стойкость работы при широких колебаниях количества и качества очищаемого газа, возможность комбинированной системы очистки газов.

Данным требованиям отвечают роторные вихревые аппараты для мокрой очистки газов. Разработка таких установок делает возможным: повышение эффективности очистки газоздушных смесей; значительное снижение как основных производственных затрат, так и затрат на монтаж. Кроме того, положительный экономический эффект может быть достигнут за счет уменьшения производственных площадей, а также снижение затрат на транспортирование оборудования [2].

Для интенсификации процессов тепломассопередачи перспективными являются центробежные аппараты, в которых взаимодействие между фазами осуществляется в условиях повышенной турбулентности потоков благодаря влиянию вращающегося ротора. Кроме того, существует реальная возможность создания высокой площади поверхности межфазного контакта в единице объема за счет создания тонких пленок и мелких капель жидкости и газа.

Мокрый пылеуловитель с тороидальной рабочей камерой и вращающимся механическим завихрителем предназначен для очистки воздуха, выбра-

сываемой в окружающую среду после сжигания угля на котельной шахты (шахтная котельная оснащена двумя котлами ДКВР-6,5/13).

В соответствии с требованиями санитарно-гигиенических норм эффективности очистки аспирационного воздуха от дымовых газов должна составлять не менее 99,8 %, поэтому в котельной угольного предприятия был установлен роторный вихревой аппарат для очистки дымовых газов, состав которых представлен в табл. 1 [3].

Таблица 1

Состав дымовых газов

Вещество	Концентрация, мг/м ³		Эффективность очистки, %
Оксид азота	15–12	5,7–3,9	62–67
Диоксид азота	5–4	1,5–1,0	70–75
Диоксид серы	400–380	140–114	65–70
Механические примеси (зола)	600–460	9–4,6	98,5–99

Параметры, характеризующие условия эксплуатации:

- температура окружающего воздуха от 0 до 50 °С;
- атмосферное давление от 630 до 795 мм. рт. ст.;
- относительная влажность воздуха от 30 до 80 %;
- отсутствие агрессивных сред.

Техническая характеристика. Показатели назначения:

- производительность, м³/ч, не более: 36000;
- температура газа на входе в пылеуловитель, °С: 130–250;
- создаваемый напор, мм. в. ст.: 150–200;
- допустимое давление на входе, мм. в. ст., не более: 300;

среда рабочая – дымовые газы:

- удельный расход воды на орошение, мл/м³, не более: 500;

- мощность потребляемая, кВт: 30;
- частота вращения вала завихрителя: 1440;
- габаритные размеры пылеуловителя, мм:**
- диаметр рабочего колеса: 1200;
- высота рабочего колеса: 200;
- наружный диаметр рабочей камеры: 1600;
- внутренний диаметр рабочей камеры: 800;
- высота рабочей камеры: 500;
- масса, кг, не более: 1000;
- габаритные размеры бака, мм:**
- длина: 2000;
- ширина: 2000;
- высота: 1800;
- масса, кг, не более: 1500.

2. Анализ литературных данных

В ряде отраслей промышленности для тонкой очистки газов от пыли применяют мокрые пылеуловители [4]. В качестве орошающей жидкости чаще всего применяют воду. Однако если ведется комплексная очистка газа от пыли и других газообразных компонентов, то выбор орошающей жидкости зависит от типа абсорбционного процесса [5]. С целью предотвращения или уменьшения объема сточных вод, образующихся при очистке от пыли, применяют замкнутую систему орошения. К основным требованиям, предъявляемым к системам очистки газа относятся высокая эффективность, малая энергоемкость и эксплуатационная надежность. Эффективность практически всех пылеуловителей зависит от свойств улавливаемых примесей и очищаемого газа, а также от конструкции очистного аппарата.

Определенный интерес представляют ротационные мокрые пылеуловители, у которых образование межфазной поверхности происходит за счет механических приводов [6]. В этих пылеуловителях газовый поток всасывается в полость вращающегося ротора. Сюда же с помощью насоса подается осветленная вода. Газожидкостная смесь с большой скоростью выбрасывается из каналов ротора, смоченные частицы пыли при этом ударяются о стенку аппарата и смываются жидкостью в бак-отстойник. Циклонно-ротационный аппарат имеет ряд преимуществ по сравнению с другими аппаратами: действуя как газодувка, он создает разрежение во всасывающем и давление в нагнетательном патрубке, благодаря чему может работать автономно (без вентилятора) и подвергаться очистке газы, не имеющие начального избыточного давления; благодаря большой центробежной силе, действующей на частицу в ротационной части пылеуловителя, он эффективно улавливает частицы пыли менее 10 мкм; с помощью вращающегося ротора достигается тонкое диспергирование жидкости и исключительно равномерное орошение стенок аппарата, что способствует повышению

эффективности улавливания мелкодисперсной и слипающей пыли.

Конструкции аппаратов для мокрой очистки газовых потоков разнообразны, т. к. разнообразны промышленные условия, в которых они находят применение. Существуют различные классификации мокрых пылеуловителей: по принципу работы, организации контакта фаз, турбулизации жидкости, воздействующим на частицы силам и состоянию жидкой фазы и т. д.

По принципу работы и конструктивным признакам [7] мокрые пылеуловители подразделяют на: полые газопромыватели (оросительные устройства; промывные камеры; полые форсуночные скрубберы); насадочные скрубберы; тарельчатые газопромыватели (барботажные и пенные аппараты); газопромыватели с подвижной насадкой; мокрые аппараты ударно-инерционного действия; мокрые аппараты центробежного действия; механические газопромыватели (механические скрубберы, динамические скрубберы); скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури, эжекторные скрубберы).

По затратам энергии мокрые пылеуловители подразделяют на низконапорные — гидравлическое сопротивление менее 1500 Па, средненапорные — гидравлическое сопротивление от 1500 Па до 3000 Па и высоконапорные — гидравлическое сопротивление больше 3000 Па.

Поверхность контакта в аппаратах зависит от метода ввода (диспергирования) одной фазы в другую. При диспергировании газового потока в жидкость (тарельчатые) образуются газовые струи и пузырьки, причем по мере потери энергии газовые струи вновь распадаются на отдельные пузырьки. При диспергировании жидкости в газовый поток образуются жидкие струи, распадающиеся на капли.

Помимо пузырьков и капель в ряде аппаратов роль поверхности контакта играет пленка жидкости, стекающая по поверхности насадки (насадочные скрубберы) или по внутренним стенкам аппарата (циклон с мокрой пленкой) [8].

В ряде аппаратов встречаются несколько видов контакта газового потока с орошающей жидкостью. В действительности различные виды поверхностей контакта фаз и движения наблюдаются в большинстве мокрых пылеуловителей, что делает затруднительным четкую классификацию аппаратов по видам контакта фаз, и приведенные данные рассматриваются как наиболее характерные для данного типа аппаратов.

3. Постановка проблемы

Целью работы являются исследование закономерностей процесса очистки газовых выбросов в роторном вихревом аппарате, интенсификация его работы и усовершенствование конструкции.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить такие задачи:

- провести анализ литературных источников и обосновать выбор перспективной конструкции аппарата для дальнейших исследований достижения высокой степени очистки газовых выбросов;
- экспериментально исследовать потоки жидкой и газовой фаз в аппарате, а также влияние технологических параметров на эффективность улавливания пыли;
- провести исследования опытного образца аппарата, с целью дальнейшего применения данного аппарата в очистке воздуха на промышленных предприятиях.

Роторный вихревой аппарат состоит из корпуса, представляющего собой полый тор. Внутри корпуса размещено колесо с радиальными лопатками, причем поверхность колеса является продолжением внутренней поверхности тора. Колесо через подшипниковый узел приводится в движение электродвигателем. Внутренняя поверхность тора разделена перегородкой на всасывающую и нагнетательную полости. Во всасывающей полости тора расположены всасывающий и напорные патрубки. Во всасывающую полость вместе с воздушным потоком подается жидкость на орошение. На внутренней поверхности проточной части расположены направляющие элементы для создания капельного движения жидкости.

Выполнение роторного вихревого аппарата в виде тороидальной камеры с размещенным в ней вращающимся колесом, позволяет создать во внутренней полости тора вихревой винтообразный поток взаимодействующих фаз с полным отсутствием застойных зон.

- Пылеуловитель прост по конструкции, технологичен при изготовлении, не требует разработки или приобретения нового специального оборудования.
- При разработке конструкции пылеуловителя использовано А.с. № 1604388 СССР, МКИ В 01 Д 3/30, патент на полезную модель № 29985, МПК (2006) В 01 Д 3/00.
- Основной конструкционный материал — ст. 3 ГОСТ 380-88. Дефицитные изделия и материалы в конструкции пылеуловителя не применяются.

4. Результаты экспериментальных исследований состава газообразных примесей и эффективности улавливания пыли

Исследование воздуха, удаляемого от котельной при сжигании каменного угля показало, что он содержит дымовые газы, состав которых приведен в табл. 1 [9].

При замерах газообразных компонентов воздуха в качестве поглотителя использовалась вода. Запыленность потока определяли весовым методом с использованием фильтров АФА-ВП-10.

Так как в процессе очистки использовались дымовые газы при сжигании каменного угля, то температура воздуха перед роторным вихревым аппаратом составляла 130 °С.

Пары воды, содержащиеся в очищаемом воздухе, конденсировались, газообразные примеси растворялись в воде и вместе с водой отводились в бункер роторного вихревого аппарата.

Исследования проводились при работе роторного вихревого аппарата как по проточной схеме, так и по схеме с полной рециркуляцией воды. Максимальный расход жидкости (воды) рассчитывали из условий охлаждения очищаемого воздуха до температуры конденсации паров воды и запыленности отходящего воздушного потока. Удельный расход воды на очистку воздуха составлял не менее 0,3 л/мин.

На рис. 1–4 показано снижение концентраций загрязняющих веществ в воздушном потоке и эффективность работы газоочистного оборудования.

Для улавливания загрязняющих пылевидных веществ одной и той же концентрации повышение эффективности сопровождается ростом энергопотребления; для улавливания более мелких частиц также затрачивается больше энергии при той же эффективности [10].

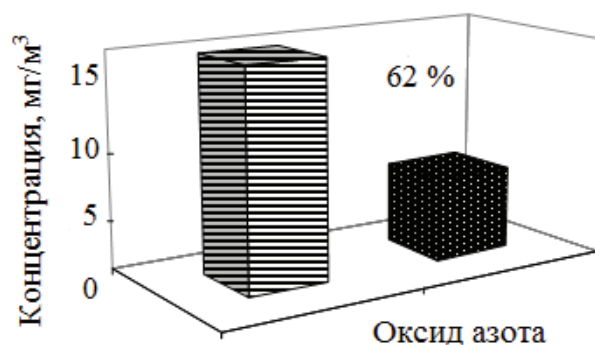


Рис. 1. Сравнительная оценка эффективности очистки и снижение концентрации оксида азота

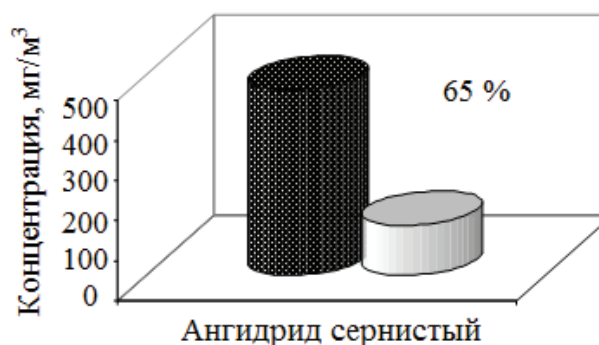


Рис. 2. Сравнительная оценка эффективности очистки и снижение концентрации сернистого ангидрида

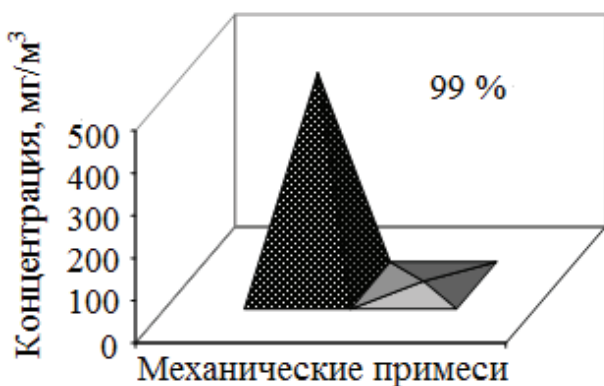


Рис. 3. Сравнительная оценка эффективности очистки и снижение концентрации механических примесей



Рис. 4. Сравнительная оценка эффективности очистки и снижение концентрации двуокиси азота

На рис. 5 представлена сравнительная оценка аппаратов по количеству затрачиваемой энергии. Для сравнения были выбраны аппараты для

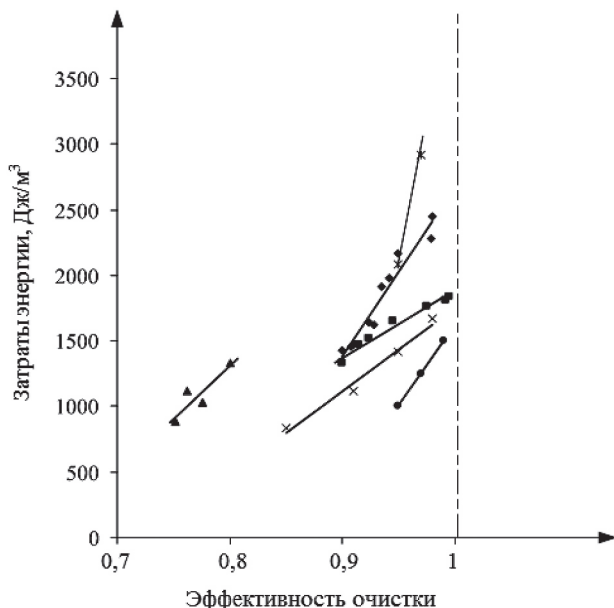


Рис. 5. Сравнительная характеристика аппаратов мокрой очистки газов от количества затрачиваемой энергии:
 ◆ — роторный вихревой аппарат без направляющих элементов; ■ — роторный вихревой аппарат с направляющими элементами; ▲ — батарейный циклон; × — центробежный скруббер; ● — пенный аппарат; * — центробежно-барботажный аппарат

очистки воздуха от пыли, размеры частиц которых составляют ~ 3–5 мкм: роторный вихревой аппарат с гладкой проточной частью, роторный вихревой аппарат с направляющими элементами; батарейный циклон; центробежный скруббер; центробежно-барботажный аппарат и пенный аппарат. Все рассмотренные аппараты, предназначенные для мокрой очистки газов достигают максимальной эффективности очистки, но с разным количеством затрат энергии. Аппарат с направляющими элементами достигает максимальной эффективности очистки с затратами энергии на 40 % меньше чем аппарат с гладкой проточной частью.

Для достижения максимальной эффективности очистки необходимо учесть все параметры, влияющие на положительное протекание процесса очистки:

– Одной из рекомендаций является уточнение численного значения толщины пленки жидкости, которая движется по внутренней поверхности проточной части.

В предыдущем разделе описан механизм процесса улавливания пыли в роторном вихревом аппарате, из которого следует, что толщина пленки жидкости в аппарате зависит от коэффициента заполнения, который в свою очередь является функцией, зависящей от расхода воды внутри аппарата и расхода воздуха. В выражении:

$$h_{пл} = \frac{2}{3} \cdot K_3 \cdot r,$$

определена величина высоты пленки жидкости.

Необходимо определить численное значение $h_{пл}$. Из рис. 6 видно, что для работы аппарата в нормальном режиме, т. е. не учитывая процесс захлебывания, значение K_3 для аппарата с гладкой проточной частью будет находится в пределах от 0,05 до 0,09, а для аппарата с установленными направляющими элементами значение K_3 будет составлять от 0,03 до 0,065. Подставив значения K_3 получим численное значение $h_{пл}$ для аппарата с гладкой проточной частью и с установленными направляющими элементами.

Для аппарата с гладкой проточной частью $h_{пл} = 0,033...0,06 \cdot r$, а для аппарата с установленными направляющими элементами $h_{пл} = 0,02...0,043 \cdot r$.

– Второй практической рекомендацией, касающейся роторного вихревого аппарата, является значение k_M , которое по нашим экспериментальным наблюдениям составляет $0,4/\gamma$.

Численные значения γ для РВА находятся в пределах от 0,1 до 0,4 (рабочая область аппарата). Исходя из рис. 7 значение k_M для аппарата с установленными направляющими элементами составляет от 1,14 до 4.

Для аппарата с гладкой проточной частью (рис. 8) значение k_M находится в пределах от 1,02 до 2,67.

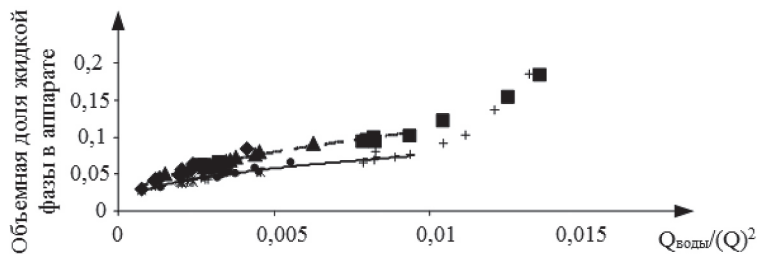


Рис. 6. Влияние режимных параметров на объемную долю жидкой фазы в аппарате

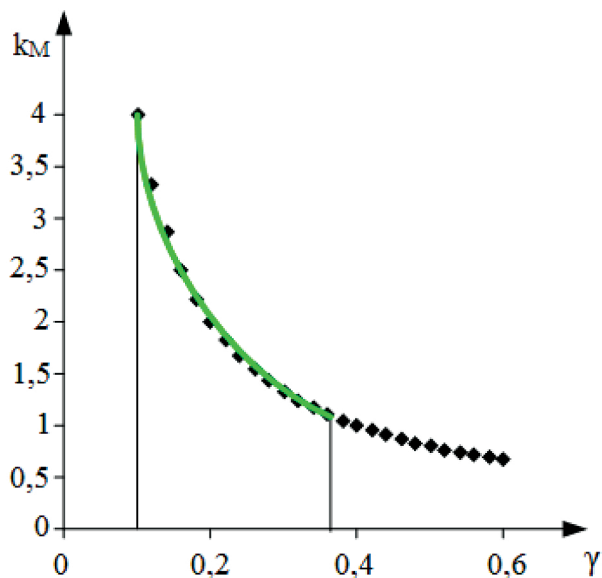


Рис. 7. Зависимость k_M от коэффициента расхода воздуха для РВА с установленными направляющими элементами

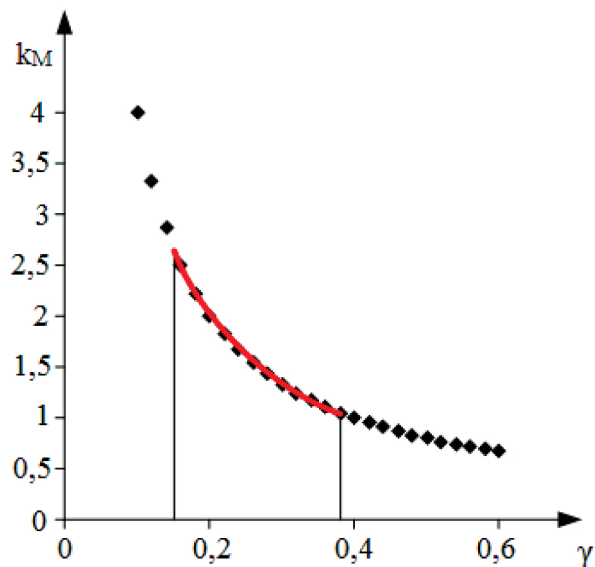


Рис. 8. Зависимость k_M от коэффициента расхода воздуха для РВА с гладкой проточной частью

— Для достижения максимальной эффективности очистки при очистке отходящих газов на промышленном предприятии необходимо учитывать и правильно подбирать размеры аппарата.

В данном случае имеется ввиду отношение радиуса рабочей камеры к радиусу сечения рабочей камеры (R/r) для РВА должно находиться в пределах от 2 до 4. Для определения эффективности очистки необходимо учитывать размер частиц, которые подвергаются очистке. Для очистки в РВА рекомендуется использовать отходящие газопылевые потоки, размеры частиц которых находятся в пределах от 2 до 10 мкм. Так для РВА эффективность очистки необходимо рассчитывать по формуле, которая учитывает вышеприведенные конструктивные и технические характеристики аппарата:

$$\eta = 1 - 4,22 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{3,22 \cdot 10^{-7}}{R \cdot r \cdot \omega \cdot K_3 \cdot d_q}\right). \quad (1)$$

Для получения и поддержания условия существования капельного движения жидкости в РВА с направляющими элементами должно выполняться условие:

$$k_M \lambda' \frac{\omega_{пл. окр}^2}{g \cdot r} = Fr_M > 1,3 - 1,5. \quad (2)$$

Аппараты, удовлетворяющие условию (2), будут работать в «четвертом» капельном, наиболее эффективном, режиме.

— Значения скорости движения жидкости (ω , м/с) для РВА составляет от 1 до 2 м/с.

Исходя из наших экспериментальных наблюдений, значение k_M равно $0,4/\gamma$. Численное значение коэффициента расхода воздуха должен находиться в пределах от 0,28 до 0,33.

Для достижения капельного движения жидкой фазы в РВА также должно выполняться условие:

$$\frac{\lambda' R}{2,5 \gamma \cdot h} > 1,3 - 1,5. \quad (3)$$

Тогда численное значение коэффициента трения λ' должно находиться в пределах от 0,0015 до 0,015. Значение Радиуса (R) составляет от 1,5 до 2,2.

5. Выводы

В данной работе описаны параметры, характеризующие условия эксплуатации опытно-промышленной установки роторно вихревого аппарата.

1. Представлено экспериментальное исследование состава газообразных компонентов и эффективности

их очистки. Исследованию подвергались газозадушенные выбросы следующего состава: оксид азота, диоксид азота, диоксид серы, механические примеси (зола). Эффективность по данным компонентам была достигнута: 62 % — оксид азота, 75 % — диоксид азота, 65 % — диоксид серы, 99,9 % — механические примеси (зола).

2. Проведена сравнительная характеристика аппаратов мокрой очистки газов от пыли с диаметром частиц от 3 до 5 мкм. Выявлено, что все рассматриваемые аппараты достигают максимальной эффективности очистки, кроме батарейного циклона, но с различной затратой электроэнергии. В данном случае особый интерес представлял РВА с гладкой проточной частью и РВА с установленными направляющими элементами. Установлено, что РВА с гладкой проточной частью достигает максимальной эффективности очистки с затратами энергии на 40 % больше, чем РВА с установленными направляющими элементами.

3. Для достижения максимальной эффективности очистки даны практические рекомендации по их достижению.

Литература

1. McWilliam, M. Development of a Wind Tunnel Test Apparatus for Horizontal Axis Wind Turbine Rotor Testing [Text] / M. McWilliam, D. Johnson // ASME 2008 2nd International Conference on Energy Sustainability. — Vol. 2. — P. 679–687. doi:10.1115/es2008-54194.
2. Питак, И. В. Основы теории и расчета деталей роторного аппарата [Текст] / И. В. Питак // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 4/7(58). — С. 14–18.
3. Питак, И. В. Определение эффективности очистки газозадушенного потока в роторном массообменном аппарате [Текст] / И. В. Питак, А. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2007. — № 5/4(29). — С. 9–12.
4. Машины та апарати у хімічних, харчових і переробних виробництвах [Текст]: підручник / Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, В. П. ШАПОРЕВ, В. Ф. МОІСЕЄВ, О. Г. ТРОШИН, Є. В. МАНУЙЛО, І. В. ПІТАК та ін. — Х.: Колегіум, 2011. — 606 с.
5. Питак, И. В. Аппарат для проведения процессов абсорбции и газоочистки [Текст] / И. В. Питак, П. П. Хусточкин, В. Ф. Моисеев, В. П. Шапорев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». — Нові рішення в сучасних технологіях. — 2005. — № 9. — С. 3–6.
6. Алексеенко, С. В. Введение в теорию в концентрированных вихрях [Текст]: учебное пособие / С. В. Алексеенко, П. А. Куйбин, В. П. Окулов. — Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. — 504 с.
7. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст]. Т. 1. Криволинейные потоки: учебное пособие / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. — ИТТФ НАНУ: Изд. НАН Украины, 2000. — 190 с.
8. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст]. Т. 2. Криволинейные потоки: учебное пособие / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. — ИТТФ НАНУ: Изд. НАН Украины, 2000. — 190 с.
9. Пітак, І. В. Можливості використання тородального контактного елемента в вугільній промисловості [Текст] / І. В. Пітак, О. Г. Трошин, В. Ф. Моїсєєв, В. П. Шапорєв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». — Нові рішення в сучасних технологіях. — 2006. — № 10. — С. 137–142.
10. Englert, G. W. Investigation of first stage of two-stage turbine designed for free-vortex flow [Electronic resource] / G. W. Englert, A. O. Ross. — Washington, D. C.: National Advisory Committee for Aeronautics, 1950. — 30 p. — Available at: \www/URL: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1950/naca-tn-2107.pdf>. — 30.05.2014.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОГО ЗРАЗКА РОТОРНОГО ВИХРОВОГО АПАРАТУ

Описано параметри, що характеризують умови експлуатації дослідно-промислової установки. Представлено експериментальне дослідження складу газоподібних компонентів та ефективності їх очищення. Проведена порівняльна характеристика апаратів мокрої очистки газів від пилу. Встановлено, що апарати досягають максимальної ефективності очищення, але з різною витратою електроенергії.

Ключові слова: очищення, роторний вихровий апарат, пил, газ, ефективність, витрати енергії.

Пітак Інна Вячеславівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімічної техніки і промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: ipitak5@gmail.com.

Пітак Інна Вячеславівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімічної техніки і промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Pitak Inna, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: ipitak5@gmail.com