

УДК 621.438+622.691.4.052

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ГАЗА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ПРЯМОТОЧНО-ЦЕНТРОБЕЖНОМ СЕПАРАТОРЕ

©2011 Г. А. Глебов, А. И. Хазбулатов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева (КАИ)

На основе экспериментальных и расчётных исследований получены новые данные по структуре течения и основным характеристикам прямоточно-центробежного сепаратора. Выявлено влияние длины вихревой камеры, ширины сепарационной щели, наличия или отсутствия отсоса из контейнера сбора частиц, а также размера частиц на степень очистки газа от механических примесей.

Вихревая камера, сепарационная щель, тангенциальный лопаточный завихритель, зона обратных токов, степень очистки.

На практике часто возникает задача очистки воздуха (газа) от механических или жидких частиц, например в газоперекачивающих агрегатах (ГПА). В качестве привода компрессора в ГПА широко используются газотурбинные установки. Механические примеси (пыль и др.), находящиеся в воздухе, проходя через газотурбинную установку, приводят к загрязнению лопаток компрессора и турбин и их абразивному износу. Поэтому на входе в ГПА ставят воздухоочистительные устройства. Основными требованиями к воздухоочистительным устройствам ГПА являются простота конструкции, высокая эффективность (степень) очистки и малое гидравлическое сопротивление. Анализ известных воздухоочистителей, таких как циклоны и вихревые пылеуловители [1], показал их довольно высокую степень очистки 86...92 % и 96,5...98 % соответственно, однако эти воздухоочистители имеют существенный недостаток – большое гидравлическое сопротивление. Так, согласно [2] гидравлическое сопротивление вихревых пылеуловителей составляет 2,8...3,7 кПа, что существенно выше регламентируемых техническими условиями ГПА ~600 Па.

Обзор научно-технической литературы показал также, что наиболее пер-

спективным для ГПА представляется прямоточно-центробежный сепаратор (ПЦС) [3-6]. Принцип действия ПЦС основан на отделении твёрдых или жидких частиц от несущего воздушного (газового) потока в поле центробежной силы, возникающей в закрученном потоке. Закрученный поток создаётся в трубе или вихревой камере с использованием специального завихрителя. За счёт разности плотностей частиц и воздуха частицы отбрасываются к стенке и выходят через кольцевую (сепарационную) щель, а очищенный воздух (газ) истекает через центральный патрубок, расположенный в конце вихревой камеры (рис.1). Несмотря на относительно широкое применение ПЦС в настоящее время отсутствуют расчётные методики и экспериментальные данные по выбору их оптимальных параметров, таких как тип завихрителя, длина вихревой камеры, ширина сепарационной щели, наличие или отсутствие отсоса из контейнера сбора отсепарированной примеси для улучшения работы сепаратора [7].

Цель статьи – на основе экспериментальных и расчётных исследований определить влияние длины вихревой камеры, ширины сепарационной щели, отсоса частиц и других факторов на эффективность работы ПЦС.

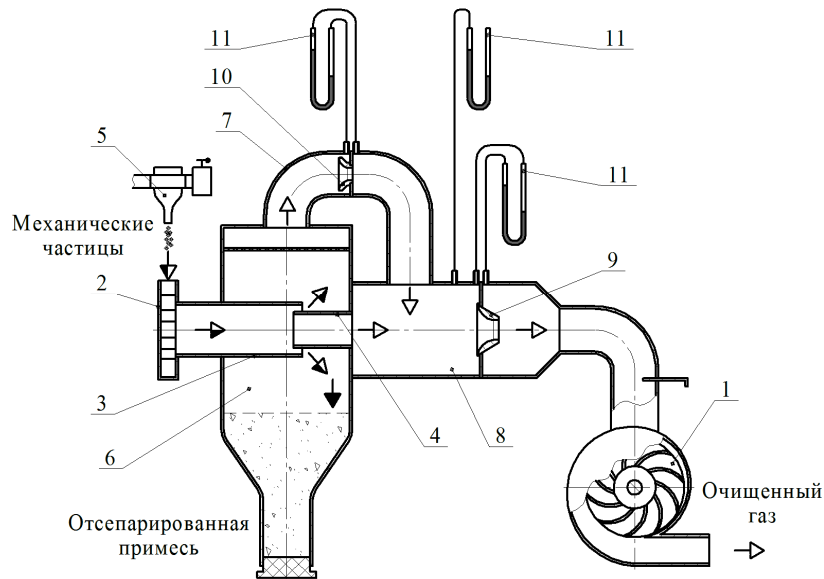


Рис. 1. Схема прямоточно-центробежного сепаратора:

- 1 – вентилятор; 2 – тангенциальный лопаточный завихритель; 3 – вихревая камера; 4 – патрубок отвода очищенного газа; 5 – дозатор подачи частиц; 6 – контейнер сбора отсепарированной примеси; 7 – трубопровод отсоса газа; 8 – коллектор; 9, 10 – мерные сопла; 11 – U-образный манометр

Эксперименты были проведены на газодинамической установке, работающей на отсасывание (рис.1). В состав установки входят: вентилятор 1 со специальным регулятором расхода воздуха; ПЦС, состоящий из тангенциального лопаточного завихрителя 2, вихревой камеры 3 (трубы) и патрубка отвода очищенного газа 4; дозатор подачи частиц 5; контейнер сбора отсепарированной примеси 6; трубопровод отсоса газа 7; коллектор 8. В качестве несущей среды служил воздух, в качестве механических примесей использовались порошки разного состава и размера частиц. Дозатор представлял собой сужающееся сопло с вибратором и обеспечивал подачу частиц с концентрацией в пределах $5...20 \text{ г/м}^3$. Во всех экспериментах использовался один и тот же тангенциальный лопаточный завихритель [8] (рис.2), обеспечивающий степень закрутки $W_\tau/W_0=2$, где W_τ – тангенциальная скорость на входе в вихревую камеру, W_0 – среднерасходная скорость через сепаратор.

В процессе экспериментов диаметр вихревой камеры был постоянен $d=46 \text{ мм}$. Длина вихревой камеры изменялась в

пределах $1,4...6 d$, а ширина сепарационной щели улавливания механических частиц в пределах $(0,174...0,348) d/2$. Число Рейнольдса, взятое по среднерасходной скорости в вихревой камере и её диаметру, составляло $\sim 3 \cdot 10^4$, что соответствовало турбулентному режиму течения.

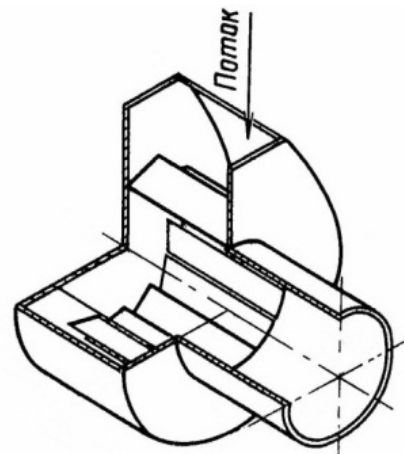


Рис. 2. Тангенциальный лопаточный завихритель

С помощью мерных сопел 9 и 10 в процессе экспериментов измерялись расход через ПЦС и расход воздуха, отсасываемого из контейнера сбора отсепариро-

ванной примеси, соответственно. Отсос воздуха из контейнера осуществлялся с целью исключения процесса осаждения частиц в области сепарационной щели. Расход последнего составлял 25% от суммарного расхода через сепаратор. Перепад давления на ПЦС измерялся с помощью U-образного манометра 11 и во всех экспериментах поддерживался в пределах 600 Па. Степень очистки определялась как отношение массы отсепарированной примеси в контейнере к исходному количеству механической примеси. Измерение исходной и отсепарированной массы частиц производилось с помощью электронных весов ML-A02 с погрешностью 100 мг. Масса исходной примеси в одном опыте составляла ~160...200 г.

Перед проведением эксперимента были выполнены численные расчёты течения в ПЦС с использованием программы вычислительной гидродинамики FLUENT на базе учебной лицензии КНИТУ им. А. Н. Туполева (КАИ). Для этого была построена трёхмерная модель воздушного потока ПЦС. В качестве граничных условий задавался перепад давления на сепараторе, равный 600 Па. На входе в завихритель задавалось атмосферное давление, а на выходе, т. е. в коллекторе – разрежение в 600 Па. Относительная длина вихревой камеры l/d изменялась от 3 до 6 калибров. На область течения была наложена сетка с различными размерами ячеек от 1,5 до 5 мм. Сетка сгущалась у стенок для более точного решения. Для завихрителя использовалась сетка с *tetra/hybrid* элементами, а для вихревой камеры с *hex/wedge* элементами. Сначала был проведён расчёт однофазного течения для определения скоростей газа на входе в сепаратор. Использовалась модель турбулентности *Reynolds Stress*. Далее проводился расчёт двухфазного течения газа. В качестве основной фазы задавался воздух, в качестве второй – круглые частицы диаметром 9 мкм. Некоторые результаты расчёта представлены на рис.3.

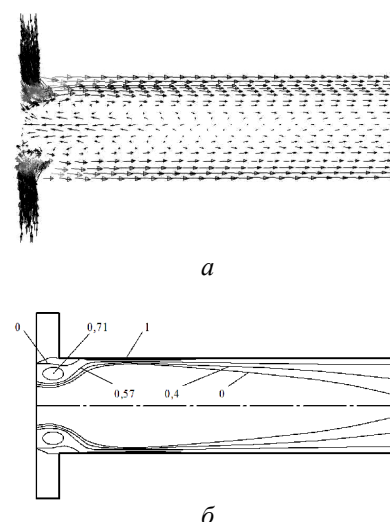


Рис. 3. Поле векторов движения воздуха (а) и поле концентраций частиц в ПЦС (б)

Анализ поля векторов движения воздуха в продольном сечении вихревой камеры (рис.3, а) выявил чёткие границы зоны обратных токов. Результаты расчёта поля концентраций частиц (рис.3, б) показали, что под действием центробежной силы частицы довольно быстро в пределах одного калибра длины вихревой камеры устремляются к стенке. При $l/d > 1...1,5$ вследствие уменьшения степени закрутки потока за счёт трения о стенки турбулентных пульсаций частицы вновь вовлекаются в ядро потока.

Расчёты и эксперименты показали существенное влияние длины зоны обратных токов (ЗОТ) на структуру течения и степень очистки ПЦС. Длина ЗОТ измерялась с помощью струны, натянутой вдоль оси вихревой камеры, с закреплёнными на ней шелковинками. Продольное перемещение струны позволило выделить точку *S* конца ЗОТ (рис.4). На рис.4 представлены результаты расчётов и экспериментов по длине ЗОТ. Видно, что при длине вихревой камеры $l/d = 2,5...3,0$ расстояние от завихрителя до точки *S* постоянно и составляет $l_s/d = 1,8$. При приближении патрубка отсоса очищенного газа к завихрителю при $l/d < 2,5$ длина ЗОТ начинает существенно уменьшаться и при $l/d < 1,5$ точка *S* располагается непосредственно на входе патрубка отсоса очищенного газа.

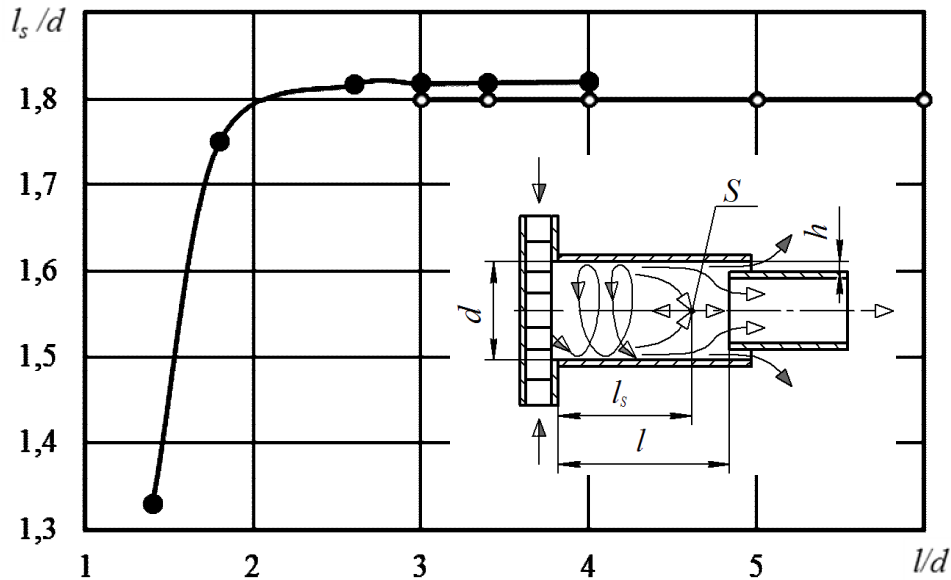


Рис. 4. Длина зоны обратных токов: \circ – расчёт; \bullet – эксперимент

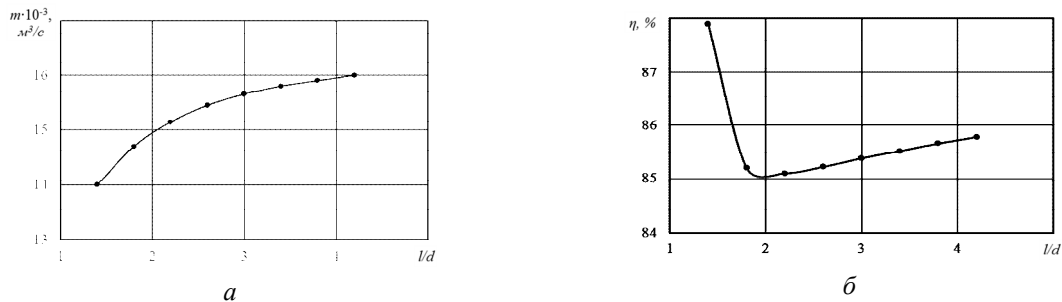


Рис. 5. Влияние длины вихревой камеры на расход (а) и степень очистки (б) ПЦС

При проведении экспериментов в работе использовались три типа механических примесей: просеянный речной песок с размером частиц от 1 до 300 мкм, плотностью $\rho=1,5 \text{ г/см}^3$; минерал $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ (тальк) с размером частиц от 3 до 30 мкм, $\rho=2,7 \text{ г/см}^3$; порошок Na – карбоксилцеллюлоза с размером частиц от 10 до 1000 мкм, $\rho=0,8 \text{ г/см}^3$.

Ввиду ограниченности статьи по объёму приведём некоторые полученные результаты.

На рис.5 представлены результаты измерения расхода m и степени очистки сепаратора η при разных значениях длины вихревой камеры. В качестве механической примеси использовался сухой речной песок, концентрация которого составляла $6,6 \text{ г/м}^3$. Перепад давления на сепараторе при всех значениях l/d поддерживался по-

стоянный 600 Па, а ширина сепарационной щели составляла $2h/d=0,174$.

Из рис.5, а видно, что с уменьшением l/d расход через сепаратор m падает, несмотря на уменьшение длины вихревой трубы и её гидравлического сопротивления. Заметим, что во всех экспериментах расход через трубопровод отсоса газа был постоянный и составлял $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, или 25...28% от суммарного расхода через ПЦС. Анализ показал, что такое уменьшение расхода связано с влиянием ЗОТ, которую можно отождествить с аэродинамической “пробкой”, находящейся на некотором расстоянии от патрубка отвода очищенного газа. При $l/d < 2$ ЗОТ как бы “запирает” поток перед патрубком отвода очищенного газа. Это и приводит к уменьшению расхода через сепаратор (рис.5, а). Из рис.5, б видно, что при $l/d=1,4$ значительно возрастает степень

очистки воздуха от механических примесей. С одной стороны, это можно объяснить резким искривлением линии тока непосредственно перед патрубком отвода очищенного газа: более тяжелые частицы не успевают следить за газом и устремляются в щель. Резкое повышение степени очистки при $l/d=1,4$ может быть связано также с уменьшением влияния отскока частиц от вихревой трубы, так щель в этом случае как бы надвигается на область повышенной концентрации частиц (рис.3, б).

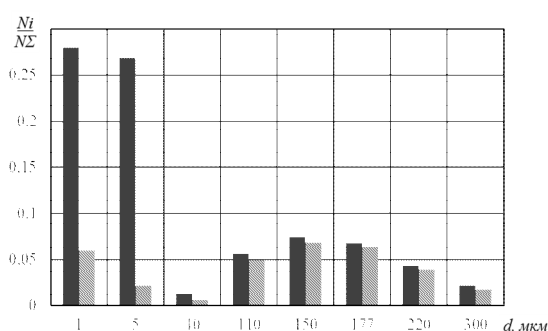


Рис. 6. Гистограмма распределения частиц речного песка по размерам: ■ – исходный состав, ☒ – отсепарированный состав

На рис.6 приведена гистограмма распределения частиц речного песка по размерам исходного состава и отсепарированного состава – собранного в контейнере. Она получена с использованием микроскопа ЛОМО-Биолам С11.

Видно, что кроме мелких частиц (менее 10 мкм) с очищенным газом вылетает и некоторое количество крупных частиц. Это объясняется отскоком частиц от стенки вихревой трубы. Отметим, что в коллекторе между патрубком отвода очищенного газа и мерным соплом были обнаружены крупные частицы.

В работе было проведено специальное экспериментальное исследование влияния ширины щели на степень очистки. Эксперименты были проведены на “сухих” частицах и воздухе влажностью, характерной для помещения. Некоторые результаты приведены на рис.7.

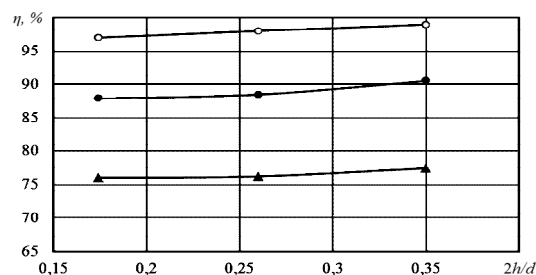


Рис. 7. Влияние ширины сепарационной щели на степень очистки ПЦС:

○ – порошок КМЦ (10...1000 мкм), ● – речной песок (1...300 мкм), ▲ – тальк (3...30 мкм)

Видно, что с увеличением ширины щели h степень очистки несколько повышается, что можно объяснить уменьшением роли отскока. Для крупных частиц степень очистки для данного вида сепаратора значительно выше.

Исследования показали, что при отсутствии отсоса в области щели собираются мелкие частицы, степень очистки уменьшается приблизительно на 8...10 %.

Полученные результаты могут быть полезны при очистке от механических примесей не только воздуха, но и природного газа в трубопроводах, попутного нефтяного газа и во многих других задачах.

Библиографический список

1. Гупта, А. К. Закрученные потоки [Текст] / А. К. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
2. Лукин, В.Д. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности [Текст] / В. Д. Лукин, М. И. Курочкина; ред. П.Г.Романкова – Л.: Химия, 1980. – 232 с.
3. Алиев, Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Текст]: справ. / Гасан Мамед-Али оглы Алиев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
4. Штокман, Е. А. Очистка воздуха [Текст]: учеб. пособие для вузов / Е. А. Штокман. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 320 с.
5. Кныш, Ю. А. Автоколебания в закрученных струях [Текст]: монография / Ю. А. Кныш. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН. – 248 с.

6. А. с. 617053 СССР, М. Кл.² В 01 D 45/12. Прямоточный циклон [Текст] / Ю. А. Кныш, С. В. Лукачёв (СССР). – № 2410674/23 – 26; заявл. 07.10.76; опубл. 30.07.78, Бюл. № 28. – 2 с.

7. Очистка промышленных газов от газообразных и дисперсных примесей

[Текст] / Е. В. Сугак [и др.] // Журн. Сиб. гос. технолог. ун-та. Химия растительного сырья. – 1998. – №3. – 125 с.

8. Аэродинамика закрученной струи [Текст] / Р. Б. Ахмедов [и др.]. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.

RESEARCH OF THE PROCESS OF CLEANING GAS FROM MECHANICAL IMPURITIES IN A DIRECT FLOW CENTRIFUGAL SEPARATOR

©2011 G. A. Glebov, A. I. Hazbulatov

Kazan national research technical university named after A. N. Tupolev

New data on the flow structure and the fundamental characteristics of a direct-flow centrifugal separator are obtained on the basis of experimental and calculation research. The influence of the vortex chamber length, separation slot width, presence or absence of sucking the gathered particles from the container, as well as the size of particles on the efficiency of cleaning gas from mechanical impurities is established.

Vortex chamber, separation slot, tangential blade vortex generator, zone of return currents, separation efficiency.

Информация об авторах

Глебов Геннадий Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры специальных двигателей, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева (КАИ). Область научных интересов: турбулентные струйные течения в каналах, теплоэнергетические установки. E-mail: Glebov_G_A@mail.ru.

Хазбулатов Артур Ильдарович, аспирант кафедры специальных двигателей, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева (КАИ). Область научных интересов: механика жидкости и газа. E-mail: hazbulatov_artur@mail.ru.

Glebov Gennady Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor of the department of special engines, Kazan national research technical university named after A. N. Tupolev (KAI). Area of research: turbulent jet flows in ducts, heat power installations. E-mail: Glebov_G_A@mail.ru.

Hazbulatov Arthur Ildarovich, postgraduate student of the department of special engines, Kazan national research technical university named after A. N. Tupolev (KAI). Area of research: mechanics of fluids. E-mail: hazbulatov_artur@mail.ru.