

М 376119

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ТИТОВ ЛЕОНИД ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫРАВНИВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ВСАСЫВАНИЯ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОТИВОТОЧНОГО РОТАЦИОННОГО ПЫЛЕУЛО-
ВИТЕЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

(специальность - 05.04.03 гидравлические машины,
машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор СУСЛОВ А.Д.

Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент СИБКОВ В.П.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ПЧЕЛКИН Ю.М.
- кандидат технических наук,
ПОЛЯКОВ Л.Е.

Ведущее предприятие - решено в решении специализированного
Совета

Защита диссертации состоится " 8 " июня 1981 г.
в 14 час. 30 мин на заседании специализированного
Совета К.053.15.07 "Криогенные, холодильные, гидравлические,
вакуумные и компрессорные машины и аппараты" факультета "Энерго-
машиностроение" МВТУ им.Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва,
Лефортовская набережная, д.1, корпус факультета "Энергомашино-
строение"

С диссертацией можно ознакомиться
имени Н.Э.Баумана

Автореферат разослан " _

Ваши отзывы в 2-х экземплярах
просьба присылать по адресу:
ул., д.5, специализированный

Ученый секретарь
специализированного Совета
кандидат технических наук
доцент

МЗ 76119

18.XI

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Характерной тенденцией развития современной техники обеспыливания является стремление к повышению эффективности разделения дисперсных систем при одновременном переходе на применение компактных, надежных, легких устройств. Данная тенденция особенно четко проявляется в транспорте, в частности в транспортных системах кондиционирования воздуха (ТСКВ), где соблюдение минимума габаритов и веса при высоком коэффициенте пылеулавливания и низких энергозатратах имеет первостепенное значение. Как показывают исследования последних лет, одним из возможных путей соблюдения этих противоречивых требований является применение противоточных ротационных пылеуловителей (ПРП), использующих способ центробежной сепарации пыли из газа с помощью принудительной закрутки пылегазового потока вращающимся ротором. Однако процессы, происходящие в таких устройствах, изучены далеко недостаточно, вследствие чего до сих пор не преодолено отрицательное влияние вторичных аэродинамических эффектов, приводящих к интенсивному вихреобразованию в проточной части, непроизводительным затратам энергии и забросу частиц пыли в очищенный газ.

Одной из основных причин возникновения указанных эффектов является значительная неравномерность скоростей всасывания (НСВ) газа по длине ротора ПРП. Неравномерность скоростей всасывания может быть устранена либо специальным профилированием ротора, либо установкой дополнительных устройств. Однако, несмотря на то, что к настоящему времени известно уже несколько способов выравнивания потока на входе в ротор, теория и инженерная методика расчета выравнивающих приспособлений (ВП) отсутствуют. Отсутствуют также систематизированные данные по эффективности того или иного вида ВП. Все это в конечном итоге задерживает более широкое внедрение в народное хозяйство пылеуловителей указанного типа.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния НСВ и ее устранения на сепарационные и энергетические характеристики ПРП, выявление рациональных путей снижения НСВ при использовании ПРП в ТСКВ, получение зависимостей для расчета выравнивающих приспособлений.

Научная новизна. Проведена оценка влияния НСВ на коэффициент пропуска пыли в ПРП, разработан способ расчета спектра вса-



сывания в вытяжной патрубок круглой формы, получены зависимости для расчета спектра всасывания во вращающийся ротор с учетом величины противодавления ротора, обусловленного его собственной вентиляционной способностью, создана методика расчета ВП, составлен энергетический баланс сепарационной ступени пылеуловителя, проанализировано влияние ВП на удельные энергозатраты и выявлен показатель энергетической эффективности применения ВП. Разработан и испытан экспериментальный образец ПРП с вытягнутой структурой потока газа на входе в ротор. Впервые осуществлены замеры поля скоростей всасывания во вращающийся ротор ПРП в относительном движении. Получены экспериментальные данные о влиянии ВП на сепарационные и энергетические характеристики ПРП.

Результаты работы. Исследование спектра всасывания при вращении позволило установить, что в роторе без ВП практически весь расход газа засасывается на половине поверхности ротора расположенной вблизи вытяжного трубопровода, причем максимальные скорости всасывания превышают среднюю в 2,5-10 и более раз в зависимости от величины противодавления и длины ротора. Теоретически и экспериментально подтверждено, что в роторе без ВП существует зона обратного выброса очищенного газа, что приводит к возникновению кольцевого вихря, потребляющего энергию на поддержание своего вращения. Результаты испытаний опытного образца ПРП показали заметное улучшение эффективности пылеулавливания при замене ротора без ВП конусным, рассчитанным по предложенной в работе зависимости (коэффициент пропуска пыли был снижен на 17-44%), при этом уменьшение общих энергозатрат достигало 51%.

Практическая ценность. Доказана возможность создания высокоэффективного пылеуловителя с практически выравненным потоком газа по длине перфорированного ротора. На основе проведенных исследований и полученных зависимостей возможна разработка ПРП для ТСКВ с коэффициентом пропуска 0,5-1% на стандартной пыли с удельной поверхностью 5600 см²/г. Использование полученных в работе зависимостей по расчету ВП при создании опытно-промышленного образца пылеуловителя позволило снизить коэффициент пропуска пыли на 20-30%.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на общемосковском семинаре "Защита окружающей среды в машиностроении" (Москва, 1977 г.), на Всесоюзной конференции "Проблемы охраны

труда" (Кишинев, 1978 г.), на научно-технических семинарах кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МВТУ им. Н.Э.Баумана (1979, 1981 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы имеется 7 статей.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 122 страницах машинописного текста, включает введение, 4 главы, выводы, приложение, иллюстрирована 104 рисунками. Библиография содержит 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе на основе анализа известных конструкций ротационных пылеуловителей показана целесообразность применения в ТСКВ противоточных пылеуловителей, которые имеют ряд преимуществ перед прямоточными и перекрестноточными: минимальные габариты и вес, практически полное отсутствие абразивного износа. Исследованиям данной группы устройств, предложенных в конце прошлого века (Р. Век), посвящены работы как отечественных (С.А.Пречистенский, И.Е.Идельчик, В.Ю.Падва, В.И.Фиксен, В.П.Новиков, В.А.Шваб, М.И.Шилев, М.В.Басилевский и др.), так и зарубежных ученых и специалистов (J. Andraez, W. Carter, K. Budinskiy и др.). В выводах проведенных исследований указывается на необходимость совершенствования аэродинамических процессов, происходящих в проточной части ПРП.

Одной из основных причин большого расхождения теоретически возможной и действительной эффективности пылеулавливания является неравномерность скоростей всасывания газа. Причина ее возникновения заключается в переменности подсасывающего действия вентилятора пылеуловителя по длине ротора. Вследствие того, что подсасывающее действие оказывается наибольшим для участков ротора находящихся вблизи вытяжного трубопровода, основная часть газа проникает внутрь ротора именно на этих участках, увлекаемая за собой и те частицы пыли, которые могли бы быть выделены из потока центробежными силами при условии равномерности распределения скоростей всасывания по рабочей поверхности ротора.

Необходимость устранения НСВ отмечалась рядом исследователей (Г.Провел, С.А.Пречистенский, К. Budinskiy и др.), поэтому к

настоящему времени предложены несколько способов выравнивания потока газа по длине ротора: дополнительное гидросопротивление, конусность ротора и др., однако данные по расчету и влиянию ВП на энергетические и сепарационные характеристики ПРП практически полностью отсутствуют.

На основании проведенного анализа были поставлены следующие задачи исследования:

1. Выявление закономерности изменения скорости всасывания по длине вращающегося ротора.
2. Оценка влияния неравномерности скоростей всасывания и ее устранения на эффективность противоточного ротационного пылеуловителя.
3. Разработка и исследование опытного образца противоточного ротационного пылеуловителя, экспериментальная проверка достоверности результатов теоретического исследования.

Во второй главе проведен теоретический анализ некоторых особенностей рабочего процесса в ПРП. Задача расчета спектра всасывания по длине вращающегося ротора решена в два этапа: на первом этапе исследован спектр всасывания в неподвижный ротор, на втором – процесс изменения этого спектра под влиянием противодействия различной величины.

Спектр всасывания в неподвижный ротор рассчитывался с помощью метода вихревых колец, применяемого в виде решения обратной задачи в газотурбостроении. В данной работе решена прямая задача при допущении, что газ является идеальным и несжимаемым. Величины коэффициентов циркуляции X_k , входящие в уравнения для определения суммарной функции тока:

$$\psi = \sum_{k=1}^N (\psi)_k = \frac{\Gamma}{2\pi} \sum_{k=1}^N X_k \sqrt{R_k} \left[\left(R_k - \frac{2}{R_k} \right) K + \frac{2}{R_k} E \right] R_0 = \frac{\Gamma}{2\pi} \sum_{k=1}^N X_k (\psi^*)_k R_0$$

где: $(\psi)_k$ – функция тока в рассматриваемой точке от одного вихревого кольца; R_k – отношение радиусов рассматриваемой точки и вихревого кольца; $R_k = \sqrt{\frac{4 R_{T_k}}{(1 + R_{T_k})^2 + z_{T_k}^2}}$ – параметр эллиптических интегралов; K, E – эллиптические интегралы I и II рода; R_0 – радиус вихревого кольца; z_{T_k} – отношение расстояния от вихревого кольца до рассматриваемой точки к радиусу вихревого кольца; N – количество вихревых колец в системе.

осевой:

$$V_{0,T} = \sum_{k=1}^N (V_{0,T})_k = \frac{\Gamma}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{X_k R_k}{R_0 R_{T_k}^{0.5}} \left[\frac{R_k^2 (1 + R_{T_k}) - 2 R_{T_k} E + K}{2 R_{T_k} (1 - R_{T_k}^2)} \right]$$

и радиальной:

$$V_{r,r} = \sum_{k=1}^N (V_{k,r})_k = \frac{\Gamma}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{X_k}{R_k} \frac{P_{r,k} Z_{r,k}}{\rho_{r,k}^{1.5}} \left[\frac{2 - P_{r,k}^2}{2 - 2P_{r,k}^2} E - K \right]$$

где: $(V_{\theta})_k, (V_{k,r})_k$ — осевая и радиальная составляющие абсолютной скорости движения газа в рассматриваемой точке от одного вихревого кольца

составляющих абсолютной скорости движения газа получены из решения системы уравнений, составлены для точек, находящихся на внешней поверхности вытяжного патрубка (заданной поверхности тока):

$$N\text{-уравнений} \quad \begin{cases} \text{const} = \Psi_{вх} = \frac{\Gamma}{2\pi} \sum_{k=1}^N X_k (\Psi_{вх}^*)_k R_k \\ \text{const} = \Psi_{вых} = \frac{\Gamma}{2\pi} \sum_{k=1}^N X_k (\Psi_{вых}^*)_k R_k \end{cases}$$

где: $\Psi_{вх}, \Psi_{вых}$ — суммарные функции тока на входе и выходе из вытяжного патрубка.

Величина циркуляции Γ системы вихревых колец подсчитывалась из уравнения расхода: $Q = \Gamma \sum_{k=1}^N X_k (\Psi_{вх}^*)_k R_k$

Предложенный способ расчета позволяет получить поле скоростей на входе в вытяжной трубопровод, учесть радиус скругления входной кромки вытяжного трубопровода, от величины которого существенно зависит уровень гидrophотер в проточной части ПРП и рассчитывать спектры всасывания в пористые роторы с любой формой его образующей. Сравнение результатов расчетов по предложенным зависимостям с экспериментальными данными Г.М. Dallavalle и М.Ф. Бромлея показало их хорошее сходство.

При вращении картина всасывания усложняется: напор ротора препятствует всасыванию газа, поэтому результирующее разрежение, а следовательно, и уровень достигаемых скоростей всасывания зависит также и от величины противодействия. Учет влияния двух противоположно направленных аэродинамических факторов (разрежение вентилятора пылеуловителя и противодействие ротора) при допущении об их суперпозиции позволит получить обобщенную зависимость для расчета спектра всасывания во вращающийся ротор в виде:

$$\frac{V_{вс,вр(k)}}{V_{вс,ср}} = \pm \sqrt{\frac{V_{вс,вр(k)}^2}{V_{вс,ср}^2} - Fr} \quad (I)$$

где: $V_{ср}$, $V_{ср}(x)$ — средняя и текущая скорость всасывания в неподвижный ротор; $\mu_{вр}$ — условный коэффициент расхода, учитывающий потери в потоке, всасываемом во вращающийся канал; $FR = \frac{2 p_{пр} \mu^2}{\rho_a V_{ср}^2}$ — фактор противодавления; $p_{пр}$ — величина противодавления; μ — коэффициент расхода в отверстиях неподвижного ротора; ρ_a — плотность воздуха.

Ввиду того, что величина разрежения, создаваемого вентилятором ПРП быстро уменьшается по мере удаления от вытяжного трубопровода, а величина противодавления ротора без ВП, зависящая, в основном, от частоты вращения и длины каналов ротора, остается постоянной, на участках ротора, наиболее удаленных от вытяжного трубопровода возможен выброс очищенного газа обратно в зону сепарации. В результате происходит исключение части ротора из процесса сепарации и, как следствие, разрастание неравномерности скоростей и образование кольцевого вихря, т.к. для обеспечения номинального расхода на выходе из ПРП в ротор должно быть подано дополнительное количество газа для компенсации выбросов. Совместное решение уравнения (I) и уравнений баланса расходов:

$$a) \int_0^{x_p^*} \sqrt{FR \left[\frac{V_{ср}^2(x)}{V_{ср}^2(x^*)} - 1 \right]} d\left(\frac{x}{L_p}\right) - \int_{x_p^*}^1 \sqrt{FR \left[\frac{V_{ср}^2(x)}{V_{ср}^2(x^*)} - 1 \right]} d\left(\frac{x}{L_p}\right) = 1 \quad (\text{наличие выбросов})$$

где: x^* — координата точки на образующей ротора, где $V_{ср} = 0$
 L_p — длина ротора

$$б) \int_0^1 \sqrt{\frac{V_{ср}^2(x)}{V_{ср}^2(x^*)} - FR} d\left(\frac{x}{L_p}\right) = 1 \quad (\text{отсутствие выбросов})$$

позволяет подсчитать величину условного коэффициента расхода $\mu_{вр}$. При наличии выбросов очищенного газа из ротора выражение для $\mu_{вр}$ имеет простой вид:

$$\mu_{вр} = \frac{1}{\sqrt{FR}} \frac{V_{ср}(x^*)}{V_{ср}^2}$$

Анализ расчетных спектров скоростей всасывания, полученных по формуле (I) для роторов с $L_p/2R_p \approx 1$ (длинные роторы ($L_p/2R_p > 1$)) наиболее распространены на практике) показал, что при изменении FR от 0 до 0,08 образования зоны отрицательных скоростей не происходит, поэтому результирующий спектр мало отличается от первоначального (спектра всасывания в неподвижный ротор). Дальнейшее возрастание FR до 3-4 приводит к быстрому уменьшению активной площади ротора и довольно существенному изменению НСВ. Увеличе-

ние FR выше 4, практически не сокращая активную площадь, вызывает резкое возрастание абсолютных скоростей всасывания. Так, например, при $FR = 10$ через уменьшенную в 2,2 раза рабочую поверхность ротора засасывается расход, равный примерно двум номинальным расходам. Расчеты показывают, что из-за наличия первоначальной неравномерности скоростей всасывания под влиянием противодействия максимальная скорость всасывания может превышать среднюю в $2,5 \pm 10$ и более раз.

Оценка влияния НСВ на эффективность пылеулавливания проводится с помощью коэффициента увеличения пропускания пыли (K_E). Размер отделяемых частиц определялся из условия равенства центробежной силы и силы аэродинамического сопротивления вблизи внешней поверхности ротора. Расчеты, проведенные на основе полученных спектров всасывания для пыли, дисперсный состав которой описывается логарифмически нормальным законом распределения, показали, что в зависимости от конкретных условий величина K_E может изменяться в пределах от 1,1 до 10 и выше. При этом увеличение напряженности центробежного поля (при прочих постоянных параметрах) приводит к уменьшению эффективности пылеулавливания. Данный вывод подтвердил необходимость устранения НСВ.

Зависимость (I) показывает, что устранение НСВ при вращении может быть достигнуто двумя путями:

1. С помощью "статических" ВП, позволяющих выравнять спектр и в неподвижный ротор.
2. С помощью "динамических" ВП, создающих переменность противодействия по длине ротора.

Анализ известных способов выравнивания потока показал, что при использовании ПРП на транспортных объектах наиболее целесообразно применять ВП, которые либо устанавливаются на поверхности ротора (сетчатая оболочка), либо соответствуют изменению одного из параметров рабочей поверхности (конусность), ввиду того, что такие ВП характеризует наибольшая технологичность, минимальность габаритов и веса, простота конструкции.

Уравнение для расчета коэффициента гидравлического сопротивления оболочки, необходимого для полного устранения НСВ:

$$\xi_{\text{н}} = \frac{1}{K_{\text{пр}}} \left[\frac{V_{\text{всн max}}^2}{V_{\text{всн ср}}^2} - 1 \right]$$

где: $K_{рт}$ - коэффициент растекания, характеризующий уменьшение площади растекания струи с максимальной скоростью из-за влияния соседних струй.

получено на основе теоретической зависимости, предложенной проф. И.Е.Идельчиком. Ввиду того, что величина $K_{рт}$ в настоящее время определяется только экспериментально, а имеющиеся в литературе данные относятся к автомодельной области течения газа, для конкретных рекомендаций по выбору характеристик подобных ВП необходимо проведение экспериментов по исследованию спектров всасывания в роторы, покрытые сетчатыми оболочками.

Расчет "динамического" ВП основан на выводе о необходимости приведения к одинаковому энергетическому уровню всех траекторий частиц движущегося газа от входа в ВП до вытяжного трубопровода. Физически это означает искусственное увеличение гидropотерь для тех струй газа, которые проходят элементы пылеуловителя кратчайшим путем, или, иначе, введение переменного противодавления ротора, соответствующего изменяющемуся по длине разрежению вентилятора пылеуловителя. Для этого случая, на основе разработанного способа расчета спектра всасывания и известного уравнения по определению собственной вентиляционной способности ротора:

$$P_{np} = P_a \frac{\pi^2 n^2}{1200 K_{np}} \left[R_p^2(x) - R_1^2(x) \right]$$

получены теоретические зависимости в виде:

$$R_p^2(x) = R_{p\min}^2 + \frac{900 V_{всн\min}^2}{\pi^2 n^2 \mu^2 K_{np}} \left[\frac{V_{всн(x)}^2}{V_{всн\min}^2} - 1 \right]$$

(для ротора с постоянным радиусом внутренней поверхности)

$$R_1^2(x) = R_{1\max}^2 - \frac{900 V_{всн\min}^2}{\pi^2 n^2 \mu^2 K_{np}} \left[\frac{V_{всн(x)}^2}{V_{всн\min}^2} - 1 \right]$$

(для ротора с постоянным радиусом внешней поверхности)

$$R_p(x) = R_{p\min} + \frac{900 V_{всн\min}^2}{2 \Delta \pi^2 n^2 \mu^2 K_{np}} \left[\frac{V_{всн(x)}^2}{V_{всн\min}^2} - 1 \right]$$

(для ротора постоянной толщины)

где: $R_p(x), R_{p\min}$ - текущий и минимальный радиус внешней поверхности ротора; $V_{всн\min}$ - минимальная скорость всасывания; n - частота вращения ротора; $R_1(x), R_{1\max}$ - текущий и максимальный радиус внутренней поверхности ротора; K_{np} - коэф-

коэффициент напора ротора; Δ – толщина ротора.
 позволяющие спрофилировать поверхность ротора в соответствии с требованиями полного выравнивания скоростей всасывания.

Введение ВП и неизбежность появления связанных с ним потерь энергии вызвали необходимость исследования энергетического баланса сепарационной ступени ПРП. С этой целью были систематизированы данные по расчету его составляющих, имеющиеся к настоящему времени в литературе и предложены зависимости для расчета потерь:
 1. На выравнивающем приспособлении в виде конусности ротора:

$$E_{кр} = g_0 \frac{V_{вснсп}^2}{2 \mu^2} \int_0^1 \left[\frac{V_{всн(x)}^2}{V_{вснсп}^2} - \frac{V_{вснmin}^2}{V_{вснсп}^2} \right] \frac{V_{всн(x)}}{V_{вснсп}} d\left(\frac{x}{L_p}\right)$$

2. С пылевым концентратом:

$$E_{пк} = g_0 \frac{L_{от} U_p^3 R_p^3}{32 Q} \left[\frac{1}{(R_k - \alpha)^2} - \frac{1}{R_k^2} \right]$$

где: $L_{от}$ – длина щели отсоса; U_p – окружная скорость внешней поверхности ротора; R_k – радиус кожуха пылеуловителя; α – высота щели отсоса.

3. С кольцевым вихрем:

$$E_{кв} = g_0 \frac{U_p^2}{2} \left(1 - \frac{R_1^2}{R_p^2} \right) (K_{пп} + 1)$$

Сравнение удельных энергозатрат до и после выравнивания позволило выявить показатель энергетической эффективности применения ВП в виде:

$$\Pi = \frac{2 FR \int_{x/L_p}^1 \sqrt{FR \left[\frac{V_{всн(x)}^2}{V_{всн(x')^2} - 1 \right]} d\left(\frac{x}{L_p}\right)}{\int_0^1 \left[\frac{V_{всн(x)}^2}{V_{вснсп}^2} - \frac{V_{вснmin}^2}{V_{вснсп}^2} \right] \frac{V_{всн(x)}}{V_{вснсп}} d\left(\frac{x}{L_p}\right)} \quad (2)$$

который при заданных геометрических размерах зависит лишь от величины фактора противодавления. В том случае, если $\Pi > 1$, применение ВП приводит к снижению общих энергозатрат в роторе. Расчеты, выполненные по (2) показали, что для длинных роторов при $FR > 2,5$ введение ВП целесообразно не только для улучшения сепарационных, но и энергетических характеристик ПРП.

Третья глава посвящена методике экспериментальных исследований ПРП. В главе приведено описание трех экспериментальных стендов, опытной модели пылеуловителя и контрольно-измерительной ап-

паратуры. Изложена методика проведения экспериментов, проведена оценка погрешности измерений.

Основное назначение первого стенда - получение данных о распределении скоростей всасывания в отверстиях неподвижных роторов без БП и с выравнивающими оболочками, устанавливавшимися на внешней поверхности ротора. Выравнивающие оболочки изготавливались из сеток 004, 0125, 018, 04 (ГОСТ 3584-73). Стенд состоял из модели входного устройства ПРП с помещенным в ней цилиндрическим ротором, вентилятора, регулятора расхода, выравнивающей решетки, измерительного узла. Ротор с отверстиями диаметром 6 мм, равномерно расположенными на цилиндрической поверхности так, что коэффициент живого сечения составлял 0,541 имел диаметры внешней и внутренней поверхности соответственно 111,4 и 95 мм и рабочую длину 105 мм. Скорость в отверстиях ротора измерялась термоанемометром СКБ ЛМОТ. Опыты были проведены при трех расходах газа: 0,013; 0,0167; 0,022 м³/с.

Данные о спектре скоростей всасывания во вращающийся ротор были получены на втором стенде, который был оснащен аппаратурой для изучения относительного движения газа. Схема этого стенда отличалась от схемы предыдущего наличием встроенного в воздушную магистраль приводного двигателя, ротора с вмонтированными в него пневмонасадками и передатчика давлений - специально разработанного устройства для передачи сигналов с вращающегося ротора на неподвижные измерительные приборы. По длине ротора в его отверстиях были установлены 6 насадков статического и 6 насадков полного давления диаметром 1 мм. Универсальная конструкция насадков, кроме измерения скоростей всасывания, позволяла также обнаружить наличие выбросов очищенного газа: при движении газа от оси вращения оба вида насадков регистрировали только статическое давление и поэтому их показания оказывались равными между собой. Выводы насадков были проложены в пазах ротора и герметично соединялись с камерами передатчика. При исследовании выравнивающего действия пористых оболочек на роторе устанавливалась соответствующая сетка. Частота вращения приводного двигателя изменялась в пределах от 100 до 4000 об/мин, а расход от 0 до 0,0517 м³/с.

Сравнительные энергетические и сепарационные характеристики роторов с выравненной и невыравненной структурой потока на вхо-

де в ротор были получены на стенде, который включал в себя магистраль: подвода запыленного газа, отвода очищенного газа, наддува противопылевого уплотнения, отвода пылевого концентрата и пробоотбора очищенного газа. Расход газа через стенд изменялся в пределах от 0,0111 до 0,0517 м³/с, частота вращения ротора — от 1000 до 4000 об/мин. Мощность на валу пылеуловителя измерялась мотор-весами, перепад давлений на элементах стенда — микроманометрами, частота вращения — электронным тахометром, скорость газа — пневмонасадками, расход газа — стандартным измерительным соплом, ротаметром, реометрами. Опытная модель пылеуловителя позволяла исследовать процессы, происходящие в сепарационной ступени пылеуловителя без учета влияния нагнетательной ступени (разрежение для просасывания газа создавали автономно работавшие вентиляторы). Переток запыленного газа в "чистую" часть предупреждался лабиринтным уплотнением с наддувом сжатого газа, над ротором был установлен цилиндрический кожух диаметром 180 мм с патрубками входа запыленного газа и выхода пылевого концентрата. Специально разработанный аналитический фильтр позволил повысить эффективность пробоотбора за счет равномерного распределения исследуемого пылегазового потока по всей поверхности фильтроэлемента и исключения оседания частиц пыли на стенках корпуса.

На стенде были испытаны: ротор без ВП, роторы с выравнивающими оболочками различной пористости, конусный ротор (при расходе 0,0167 м³/с и частоте вращения 3000 об/мин максимальный и минимальный диаметры его внешней поверхности составляли соответственно 111,4 и 102 мм, остальные геометрические размеры были одинаковы с размерами ротора без ВП). Часть экспериментов была проведена при наличии крыльчатки предварительной закрутки пылегазового потока, устанавливавшейся на торце ротора, удаленном от вытяжного трубопровода. Размеры крыльчатки: внешний диаметр — 176 мм, толщина лопаток — 4 мм, длина — 13 мм, высота — 30,5 мм.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования рабочих процессов в сепарационной ступени пылеуловителя и их сравнение с теоретическими данными. Исследование спектров всасывания в неподвижный ротор, проведенное при изменении числа $Re = \frac{V_{\text{всас}} \rho d_{\text{отв}}}{\mu}$ от 250 до 450 (здесь $d_{\text{отв}}$ — диаметр отверстий на рабочей поверхности ротора, ν — коэффициент кине-

матической вязкости) показало, что форма спектра всасывания, построенного в относительных координатах остается практически неизменной. Это дает возможность при расчетах скорости всасывания в любой точке учитывать лишь ее положение относительно вытяжного отверстия. Эксперименты подтвердили высокую степень НСВ на роторе без ВП: на половине длины ротора, находящейся вблизи вытяжного трубопровода засасывается 87% всего расхода газа. Сравнение полученного спектра с теоретическим показало, что их расхождение составляет не более $15 \pm 20\%$, причем спектр всасывания в длинный ротор может описываться зависимостями, полученными при анализе движения газа к отверстию в плоской стенке без учета наличия в зоне всасывания каких-либо экранов.

В опытах по определению степени растекания потока по длине ротора, покрытого сетчатой оболочкой постоянной пористости также получено, что изменение величины числа Re от 250 до 450 не влияло на форму спектра всасывания. Уменьшение пористости сетки приводило к снижению НСВ, что соответствует физической картине выравнивания полных энергий струек газа на плоской решетке. Результаты исследований показали, что применение сетки 004 позволяет практически полностью выравнять поток: на половине длины ротора засасывается 54% общего расхода газа.

Величины разрежений, воспринимаемых насадками полного и статического давления, измеренные при различных частотах вращения ротора и отключенном вентиляторе ПРП, были практически одинаковы по длине ротора, что свидетельствовало о постоянстве противодавления. При включенном вентиляторе пылеуловителя вблизи вытяжного трубопровода наблюдалась значительная разница в показаниях сравниваемых насадков полного и статического давления, соответствовавшая скоростям гораздо большим, чем в неподвижном состоянии. Однако эта разница быстро снижалась по мере удаления от вытяжного трубопровода и, начиная примерно с середины ротора, кривые разрежений, регистрируемые насадками различных типов, начинали сливаться, асимптотически приближаясь к значению разрежения, возникающего в каналах ротора при отключенном вентиляторе пылеуловителя, что подтвердило наличие выбросов очищенного газа. Сравнение экспериментальных и расчетных спектров всасывания во вращающийся ротор показало, что их значения вблизи вытяжного трубопровода отличаются не более чем на 15%. Экспериментами подтверждено, что ВП выравнивает спектр и во вращающийся ротор:

после установки на его внешней поверхности оболочки из сетки 004 насадки по всей поверхности ротора указывали на течение газа к оси вращения.

Сравнение мощности, затрачиваемой приводным двигателем, показало, что при вращении ротора без ВП она всегда больше, чем при наличии последнего на роторе, при этом снижение мощности, зависевшее от расхода газа и частоты вращения, достигало 35%. Аналогичная картина наблюдалась и при замерах гидравлического сопротивления сепарационной ступени: так, если в неподвижном состоянии разность замеренных гидросопротивлений у ротора, покрытого оболочкой из сетки 004 и ротора без ВП являлась положительной из-за больших потерь на мелкоячеистой сетке, то при вращении она быстро уменьшалась и уже при $n = 3000$ об/мин и $Q = 0,026$ м³/с становилась отрицательной. Анализ причин снижения общих энергозатрат при выравнивании скоростей всасывания (разница удельных энергозатрат в роторе без ВП и конусном роторе при $n = 3000$ об/мин, $Q = 0,0167$ м³/с достигала 51%) показал, что полученные результаты в многом объясняются прекращением выбросов очищенного газа из ротора.

Эксперименты, проведенные на запыленном газе, показали, что энергозатраты в конусном роторе и в роторе без ВП с течением времени практически не изменяются, в то время как в роторах, покрытых оболочками из сеток 004 и 0125 (коэффициенты живого сечения сеток составляли соответственно 32,7 и 37,2%) происходит резкое возрастание гидросопротивления, обусловленное стремительным забиванием ячеек сетки снаружи и изнутри отложениями пыли.

Результаты сепарационных испытаний подтвердили справедливость предположения об улучшении эффективности пылеулавливания посредством устранения ИСВ: на всех исследованных режимах коэффициент пропуска пыли в конусном роторе был меньше, чем в роторе без ВП, так их различие при $n = 3000$ об/мин, $Q = 0,0167$ м³/с в зависимости от удельной поверхности сепарируемой пыли достигало 17-44%. Испытания роторов с оболочками из сеток 004 и 0125 показали, что при их применении трудно добиться снижения коэффициента пропуска пыли без значительного увеличения гидросопротивления пылеуловителя.

Установка вращающейся крыльчатки предварительной запытки

пылегазового потока, несмотря на значительное повышение удельных энергозатрат (в среднем на 65%) привела не к увеличению, а к уменьшению эффективности пылеулавливания, вследствие нарушения равномерности распределения скоростей всасывания из-за подсосывающего действия самой крыльчатки и возникновения циклонных токов, способствовавших переносу отсепарированной пыли от стенок кожуха вновь к ротору.

При проведении экспериментов было обнаружено появление плотного слоя пыли на внутренней поверхности ротора, что свидетельствовало о продолжении выделения частиц пыли из газа даже при попадании их в ротор. Результаты замеров толщины слоя пыли по длине образующей ротора на сплошном участке показали, что в роторе без ВП слой пыли более интенсивно увеличивается в зоне обратных выбросов, т.к. здесь направления движения частиц пыли и газа совпадают. В конусном роторе процесс осаждения имел обратный характер - слой пыли по образующей постепенно увеличивался по мере приближения к вытяжному трубопроводу, т.к. газ равномерно втекал в ротор.

Анализ направления движения струй газа, вытекающих из каналов ротора и оставляющих следы в слое пыли, осевшей на выходном обтекателе ротора показал, что распределение переносной скорости газа внутри ротора не соответствует закону вращения твердого тела. Существование наряду с переносным относительного движения газа не позволяет ему полностью потерять избыточную энергию вращения при попадании в слой, расположенные на меньшем расстоянии от оси вращения. В результате поток газа отклоняется в сторону вращения и образует при обтекании прямолинейных лопаток большие отрывные зоны, чем и объясняется низкий аэродинамический К.П.Д. ранее применявшихся вентиляторов ПРП.

[В приложении к диссертации представлен алгоритм и программа, составленная на алгоритмическом языке "Фортран-IV", по расчету выравнивающего приспособления в виде конусности ротора.

ВЫВОДЫ

I. Установлено, что одной из основных причин снижения эффективности пылеулавливания в противоточных ротационных пылеуловителях является неравномерность скоростей всасывания газа, которая вызвана изменяющейся величиной подсосывающего действия вентилятора пылеуловителя по длине ротора. Степень неравномерности скоростей

всасывания зависит от соотношения между диаметрами ротора и вытяжного трубопровода, рабочей длины ротора, формы кожуха.

2. Разработан способ расчета спектра всасывания в круглый вытяжной патрубок, позволяющий учесть влияние радиуса скругления входной кромки вытяжного трубопровода и обоснованно подобрать параметры выравнивающих приспособлений.

3. Получены и экспериментально подтверждены зависимости для расчета спектра скоростей всасывания во вращающийся ротор с учетом собственной вентиляционной способности ротора. Теоретически и экспериментально подтверждено наличие выброса очищенного газа в роторе без выравнивающих приспособлений, приводящего как к усилению неравномерности, так и к возрастанию абсолютных значений скоростей всасывания. Показано, что относительная величина выбросов существенно зависит от первоначальной неравномерности скоростей всасывания и соотношения между противодавлением ротора и динамическим напором всасывания. Выявлено, что для длинных роторов ($L_p/2R_p \gg 1$) площадь активного участка может составлять меньше половины рабочей поверхности ротора, а максимальные скорости всасывания превышать среднюю в 2,5-10 и более раз.

4. Получено, что наиболее предпочтительным является применение выравнивающих приспособлений в виде конусности ротора. Получены зависимости для расчета трех типов конусности ротора. Применение конусного ротора в опытном образце пылеуловителя позволило снизить коэффициент пропуска пыли на 17+44%.

5. Установлено, что выравнивание скоростей всасывания позволяет устранить кольцевой вихрь, появляющийся в связи с выбросами газа из ротора. Получено, что в противоточных ротационных пылеуловителях с длинными роторами при $FR > 2,5$ выравнивание спектра скоростей всасывания целесообразно и для улучшения энергетической эффективности пылеуловителя. В результате испытаний опытного образца пылеуловителя с конусным ротором установлено, что снижение удельных энергозатрат достигает 51%.

6. Установлено, что применение сеточных оболочек с пористостью менее 37% в качестве выравнивающих приспособлений в ротационных пылеуловителях транспортных систем кондиционирования воздуха нецелесообразно ввиду быстрой забиваемости ячеек сетки.

7. Получено, что использование крыльчатки предварительной закрутки пылегазового потока, несмотря на увеличение удельных энергозатрат (в среднем на 65%), приводит к снижению эффективности

пылеулавливания.

8. Экспериментально установлено, что распределение переносной скорости газа внутри ротора не соответствует закону вращения твердого тела, что приводит к отклонению потока на выходе из ротора в сторону вращения и к образованию больших отрывных зон при обтекании плоских радиальных лопаток вентиляторных колес противоточных ротационных пылеуловителей.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Сивков В.П., Титов Л.В. Расчет выравнивающего приспособления в ротационных пылеуловителях. - Труды Моск. высш. техн. училище 1978, вып. 277, с. 57+63.

2. Сивков В.П., Титов Л.В. О повышении эффективности ротационных пылеуловителей. - Тезисы доклада на Всесоюзной конференции "Проблемы охраны труда", Кишинев, 1978, с. 285.

3. Суслов А.Д., Сивков В.П., Титов Л.В. Стенд для испытаний пылеулавливающих устройств. - В сб. "Машины, приборы, стенды. Технологическое оборудование. Каталог МВТУ № 7, М.: Внешторгиздат, 1980, с. 77.

4. Сивков В.П., Титов Л.В. Распределение потерь на выравнивающем сопротивлении в ротационных пылеуловителях. - Труды Моск. высш. техн. училище, 1979, вып. 296, с. 110+115.

5. Бекяев В.З., Титов Л.В., Сивков В.П., Манько П.С. Расчет спектров всасывания методом вихревых колец. - рукопись деп. в ЦИТИХимнефтемаш 24.9.1980, № 682. - 15 с.

6. Суслов А.Д., Титов Л.В., Кузнецов И.Д., Новаков В.П., Сивков В.П. Влияние вращения на спектр всасывания газа в ротор противоточного ротационного пылеуловителя. - рукопись деп. в ЦИТИХимнефтемаш 24.9.1980, № 680. - 11 с.

7. Суслов А.Д., Титов Л.В., Сивков В.П., Кузнецов И.Д., Новаков В.П. Об эффективности противоточных ротационных пылеуловителей с конусными роторами. - рукопись деп. в ЦИТИХимнефтемаш 24.9.1980, № 681. - 19 с.

Л - 86063 от 10.4.1981 г. объем 1 н.л. тир. 100 экз. Зак. 743

Библиография МВТУ имени Н.Э. Баумана