

66
п85

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

На правах рукописи

ПРУДНИКОВ Федор Владимирович

66.074 (043.3)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РОТОРНЫХ СЕПАРАТОРОВ
ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

05.17.08 - Процессы и аппараты химической
технологии

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1980

Работа выполнена в Белорусском технологическом институте
им. С.М.Кирова.

Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук
ПЛЕХОВ И.М.

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических
наук НИКОЛАЕВ Н.А.,

кандидат технических наук
ГУСЕЙНОВ Ч.С.

Ведущая организация: Гродненское производственное
объединение "Азот" (г. Гродно).

Защита состоится " 13 " февраля 1980 г. в 10⁰⁰ часов на
заседании специализированного совета К 056.01.03 по присуж-
дению ученой степени кандидата наук в Белорусском техноло-
гическом институте им. С.М.Кирова (220630, г. Минск,
ул. Свердлова, 13 а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорус-
ского технологического института им. С.М.Кирова.

Автореферат разослан " 10 " января 1980 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
К.Х.Н., С.Н.С.

ДЗЮБА Е.Д.

Актуальность проблемы. Рост объема промышленного производства, ускорение темпов научно-технического прогресса остро выдвигают проблему защиты окружающей среды. Загрязнение воздушного бассейна вредными промышленными выбросами вызывает серьезные нарушения экологической системы и наносит огромный ущерб народному хозяйству. В то же время вместе с отходящими газами в атмосферу выбрасывается и большое количество ценных веществ, утилизация и возврат которых заметно улучшит технико-экономические показатели производства. В нашей стране вопросы охраны природы и бережного использования, а также воспроизводства ее ресурсов подняты на уровень первоочередных задач государства. Важнейшей задачей, связанной с решением этой проблемы является разработка и освоение выпуска нового, более совершенного газоочистного и пылеулавливающего оборудования.

Сложность очистки промышленных газовых выбросов от механических примесей заключается в том, что объем отходящих газов очень велик и газовый поток, как правило, имеет низкий напор. Для очистки низконапорных газовых потоков наиболее перспективным направлением является использование центробежных сепараторов роторного типа, основное преимущество которых заключается в их высокой производительности и компактности, т.к. они выполняют одновременно функции сепаратора и вентилятора. Однако недостаточно высокая эффективность очистки газа от мелких примесей или высокое гидравлическое сопротивление сепарирующей ступени ротора ограничивает широкое использование роторных сепараторов в процессах газоочистки.

Цель работы.

1. Разработка высокоэффективных роторных сепараторов для очистки низконапорных газовых потоков от твердых и жидких примесей.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование аэро-, гидродинамики и эффективности улавливания примесей для разработки инженерного метода расчета промышленных аппаратов.
3. Внедрение и апробация роторных сепараторов для очистки газов от механических примесей.

Научная новизна. Разработаны на уровне изобретения высокоэффективные роторные сепараторы для очистки низконапорных газозовых потоков. Исследованы эффективность их работы, аэро- и гидродинамика.

Выполнен математический анализ процесса сепарации во вращающемся криволинейном канале при центральном стоке газа и уточнена аналитическая зависимость для определения предельного размера частиц, улавливаемых до сепарирующего ротора.

Получены авторские свидетельства СССР на изобретения "Центробежный сепаратор" № 521911, № 662124, решения ВНИИГПЭ от 29.06.79 о выдаче авторского свидетельства по заявке № 2680580/26, "Устройство для очистки газа от пыли", № 570381, № 550169, № 654270, № 679297.

Практическая ценность. По результатам исследований осуществлено внедрение роторно - кольцевых центробежных сепараторов (авт.свид. № 521911) в производстве капролактама на Гродненском производственном объединении "Азот". Получен экономический эффект в размере 355 тыс.руб. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что сепараторы устойчиво работают в широком диапазоне нагрузок по фазам, обладают высокой производительностью и эффективностью улавливания жидких примесей.

Внедрение центробежных сепараторов позволило улучшить показатели готового продукта и обеспечить его стабильное высокое качество. Впервые в стране Гродненскому капролактаму присвоен Государственный "Знак качества".

Автор защищает:

- результаты экспериментальных исследований аэро-, гидродинамики роторных сепараторов и их эффективности по улавливанию жидких и твердых примесей;

- математическое описание процесса сепарации во вращающихся криволинейных каналах;

- разработанную на основании анализа процесса сепарации и экспериментальных данных методику расчета роторно - кольцевого центробежного сепаратора;

- результаты промышленных испытаний роторно-кольцевого центробежного сепаратора;

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции молодых галургов (г.Солигорск, 1978 г.), на расширенном техническом Совете Гродненского Ю "Азот" (г. Гродно, 1977 г.), а также на научно-

технических конференциях Белорусского технологического института им. С.М.Кирова (1973 - 1979 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано три статьи и получено 8 авторских свидетельств СССР на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы (125 наименований советских и зарубежных авторов) и приложения. Работа изложена на 107 страницах машинописного текста и иллюстрирована 72 рисунками.

1. Разработка высокоэффективных роторных сепараторов и их сравнительные исследования

Всесторонний анализ существующих сепарационных устройств для очистки низконапорных газовых потоков от механических примесей показывает, что наиболее перспективными конструкциями, с точки зрения высокой эффективности, производительности и компактности, являются роторные сепараторы, которые в зависимости от направления движения в роторе очищаемого газа и направления действия центробежной силы могут быть классифицированы по трем основным группам: роторные сепараторы прямого, противоположного и осевого типов.

На рис. 1 представлено несколько разработанных нами конструкций роторных сепараторов.

Осевой сепаратор - вентилятор (рис. 1 а) представляет собой цилиндрический ротор 2, на котором установлены радиальные лопасти 3. Концы лопастей отогнуты в противоположные стороны и профиль лопасти состоит из трех участков. При вращении ротора отогнутые участки лопастей (I и III) работают как лопатки осевого вентилятора, обеспечивая расход газа через сепаратор, а средние участки лопастей (II) выполняют функции сепаратора. Процесс сепарации происходит во вращающихся межлопастных осевых каналах под действием центробежной силы. Примеси осаждаются на набегающие поверхности лопастей, скользят по ним к периферии и через кольцевую щель 4 корпуса I сепаратора попадают в ловушку отсепарированных примесей 5, из которой они отводятся на доочистку.

Центробежный сепаратор - вентилятор с пленкой жидкости (рис. 1 б) относится к группе прямооточных роторных сепараторов и состоит из цилиндрического корпуса I, закрытого сверху

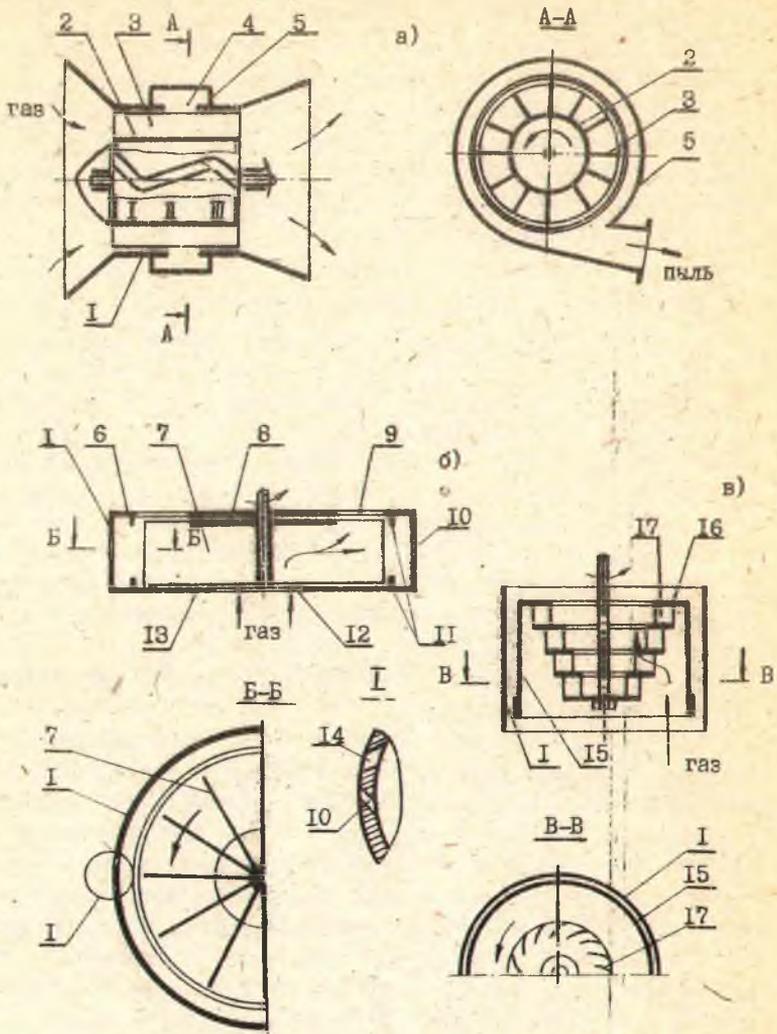


Рис. 1. Роторные сепараторы

- а - осевой сепаратор-вентилятор,
- б - центробежный сепаратор-вентилятор прямого типа,
- в - роторно-кольцевой сепаратор противоточного типа.

и снизу дисками 6 и 13, и ротора в виде радиальных лопастей 7, ограниченных сверху диском 8. При вращении ротора очищаемый газ поступает через центральное отверстие 12 нижнего диска 13 во вращающийся ротор, движется к его периферии и выходит из сепаратора через прорези 9 верхнего диска 6. На внутреннюю поверхность корпуса I по каналам 10 подается жидкость, образующая движущуюся пленку. Перед последующим каналом 10 подвода свежей жидкости расположены вертикальные прорези 14 для отвода пленки суспензии. Процесс сепарации примесей в роторе происходит так же, как и в осевом сепараторе - вентиляторе, но отсепарированные примеси, срываясь с лопастей, попадают в движущуюся пленку жидкости, которая захватывает и поглощает их.

Роторно - кольцевой центробежный сепаратор (рис. 1 в) не является вентиляторным и может быть использован для очистки низконапорных газовых потоков в сочетании с центробежной компрессионной ступенью. Сепарационная ступень выполнена в виде размещенного в обечайке 15 набора образующих ступенчатый ротор плоских колец 16, между которыми помещены криволинейные лопатки 17. Сепарация примесей происходит в две стадии: до сепарирующего ротора в поле центробежных сил, создаваемом быстровращающимся ротором, и во вращающихся криволинейных каналах ротора.

Сравнительные исследования вышеописанных конструкций по улавливанию из воздуха твердых примесей, а также исследования аэродинамики сепараторов - вентиляторов показали, что роторно - кольцевой центробежный сепаратор обладает наибольшей эффективностью улавливания твердых и особенно жидких примесей. Осевой сепаратор - вентилятор эффективно улавливает лишь крупные примеси (более $100 \cdot 10^{-6}$ м), имеет удельную производительность $\bar{Q} = 0,04$ при удельной мощности $\bar{P} = 0,23$, зато время как центробежный сепаратор - вентилятор с пленкой жидкости при удельной мощности $\bar{P} = 0,22$ имеет удельную производительность $\bar{Q} = 0,07$ и эффективно улавливает мелкие частицы ($25 \cdot 10^{-6}$ м). Однако центробежный сепаратор - вентилятор обладает очень узким диапазоном устойчивой эффективной работы.

Широкий диапазон высокоэффективной работы роторно - кольцевого центробежного сепаратора и высокая эффективность улавливания капельной жидкости предопределили выбор этой конструкции для дальнейших исследований.

2. Гидродинамика роторно - кольцевого центробежного сепаратора

2.1. Исследование и расчет гидравлического сопротивления сепарационной ступени ротора. Роторно - кольцевой сепаратор используется для очистки низконапорных газовых потоков лишь при наличии центробежной ступени, компенсирующей гидравлическое сопротивление сепарационной. При центральном стоке газа гидравлическое сопротивление сепарационной ступени складывается из потерь напора газового потока на продувку неподвижной ступени и преодоление подпора, создаваемого вращающейся ступенью

$$\Delta P_c = \Delta P_{\omega=0} + \Delta P_{\omega>0}, \text{ Па} \quad (2.1)$$

Исследовалась каждая ступень ротора поочередно. Результаты обработки опытных данных по исследованию неподвижной ступени обобщены эмпирической зависимостью, учитывающей влияние геометрических параметров ступени и газовых нагрузок на гидравлическое сопротивление

$$\Delta P_{\omega=0} = W^{2.14} \left(1 - \frac{4.78 t_0 \alpha_y}{W^{0.81}} + \frac{2.21 t_0^2 \alpha_y}{W^{0.88}} \right) \exp [13.25 - 33.3 \bar{D} + 22.1 \bar{D}^2 + (\bar{L} - 0.072)(-17 + 93.88 \bar{D} - 80 \bar{D}^2)] \quad (2.2)$$

Параметры, входящие в (2.2) изменялись в пределах: $W = 3 + 12$ м/с; $\bar{D} = 0,927 + 0,492$; $\bar{L} = 0,072 + 0,182$; $\alpha_y = 0 + 60$.

При вращении ротора исследуемая ступень представляет не что иное, как рабочее колесо центробежного вентилятора и величина теоретического давления, создаваемого вращающейся ступенью, рассчитывается согласно теории центробежных вентиляторов по полумпирической формуле в предположении обратного течения газа

$$H_r = \Delta P_{\omega>0} = \frac{\rho W R (\omega R - W \cos \alpha)}{1 + \frac{1.5 + 1.1 \alpha / 90^\circ}{2(1 - \tau^2/R^2)}} \quad (2.3)$$

Общее гидравлическое сопротивление вращающейся ступени определили как сумму (2.2) и (2.3). Стклонение расчетных значений от опытных не превышает 10%.

2.2. Расчет центробежной компенсационной ступени ротора.

Центробежная ступень роторно - кольцевого сепаратора компенсирует не только гидравлическое сопротивление сепарационной ступени, но и потери напора в самой ступени. Геометрические размеры компенсационной ступени роторно - кольцевого сепаратора для условия его безнапорности определяются из полуэмпирической зависимости

$$\frac{\rho \omega \left(\omega R_K^2 - \frac{Q \cos \beta_{2K}}{2\pi h_K} \right)}{i + \frac{1,5 + 11\beta_{2K}/90^\circ}{z_K (1 - z^2/R_K^2)}} \geq \Delta P_C + \frac{\rho \omega^2 z^2}{4} + \frac{\rho Q^3}{78,8 z^2 h_K^2 \left(\frac{z}{h_K} - 1 \right)} \text{ Па} \quad (2.4)$$

3. Исследование роторно - кольцевого центробежного сепаратора

3.1. Предельный размер частиц, улавливаемых до ротора.

В основу расчета предельного размера частиц, сепарируемых до ротора, положено динамическое равенство двух основных сил, действующих на частицу - центробежной силы и силы аэродинамического сопротивления газа, обтекающего частицу. Для одиночной сферической частицы условие равновесия на поверхности ротора радиусом R , соответствующей равновесной окружной траектории, запишется

$$\frac{\pi d_4^3}{6} \rho_4 \frac{u_4^2}{R} = \xi \frac{\pi d_4^2}{4} \frac{\rho W_{\text{отн}}^2}{2} \quad (3.1)$$

Окружная скорость частицы принята равной окружной скорости газа на периферии ротора, величина которой составляет примерно 70% от окружной скорости самого ротора. Относительная скорость частицы равна скорости газа, т.к. из условия равновесия сил радиальная составляющая скорости частицы равна нулю. Первая ступень роторно - кольцевого сепаратора эффективно улавливает крупные частицы, для которых относительная скорость больше 4 м/с. В этом случае коэффициент сопротивления движению частицы определяется по полуэмпирической формуле Л.С.Клячко для переходного режима

$$\xi = \frac{24}{Re_4} + \frac{4}{\sqrt{Re_4}} \quad (3.2)$$

После преобразования уравнения (3.1), окончательно получим

$$\omega = \frac{2,47}{d_4} \sqrt{\frac{W \cdot \mu (\delta \mu^{0,67} + W^{0,67} \cdot d_4^{0,67} \cdot \rho^{0,67})}{\rho_4 \cdot R}}, \text{ с}^{-1} \quad (3.3)$$

По уравнению (3.3) рассчитывается как предельный размер улавливаемых до ротора частиц при заданных ω и W , так и угловая скорость вращения, необходимая для улавливания частиц заданного размера d_4 . Расчет произведен для систем воздух - частицы *Носсе* ($\rho_4 = 2100 \text{ кг/м}^3$) и воздух - капли диэтилленгликоля ($\rho_4 = 1118 \text{ кг/м}^3$). Полученные результаты показывают хорошую сходимость расчетных и опытных значений для твердых частиц. Отклонение значений не превышает $\pm 5\%$. При улавливании капельной жидкости расхождение расчетных значений предельного размера частиц с экспериментальными объясняется тем, что в процессе сепарации происходит интенсивная коагуляция капель. Поэтому в случае сепарации жидких примесей формулу (3.3) используем для ориентировочного расчета предельных размеров улавливаемых до ротора капель.

3.2. Распределение скорости газа во вращающемся криволинейном канале. Для изучения распределения относительной скорости газа во вращающемся канале рассмотрено плоское течение газа между двумя соседними лопатками в системе криволинейных координат, представляющих собой линия тока газа \mathcal{L} и ортогональные к ним кривые \mathcal{R} . Согласно принципу Даламбера векторная сумма сил, действующих на выделенный в канале элемент газа, и сил инерции равна нулю. Проектируя силы на направление перемещения газа \mathcal{L} , получим дифференциальное уравнение установившегося относительного движения газа в канале

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial s} = -W \frac{\partial W}{\partial s} + \omega^2 R \frac{\partial R}{\partial s} \quad (3.4)$$

Интегрирование уравнения (3.4) вдоль линии тока, приводит к уравнению Бернулли

$$\frac{\rho}{\rho} + \frac{W^2}{2} - \frac{\omega^2 R^2}{2} = C \quad (3.5)$$

Абсолютное течение газа в роторе является безвихревым и поэтому величина C сохраняет свое значение не только вдоль одной линии тока, а и во всем канале. Это позволило продиффе-

рендривать уравнение (3.5) по нормали n и, исключая из него давление P , получить дифференциальное уравнение относительного движения газа во вращающемся канале

$$\frac{\partial W}{\partial n} = 2\omega + \frac{W}{R_A} \quad (3.6)$$

Решение уравнения (3.6) с учетом начальных условий ($W = W_m$ при $n = 0$) имеет вид

$$W = -2\omega R_A + (2\omega R_A + W_m) \exp\left(\frac{n}{R_A}\right) \quad (3.7)$$

Раскладывая $\exp\left(\frac{n}{R_A}\right)$ в степенной ряд и учитывая, что $n/R_A \ll 1$, ограничились двумя первыми членами разложения и окончательно получили зависимость распределения относительной скорости газа во вращающемся канале

$$W = W_m \left(1 + \frac{n}{R_A}\right) + 2\omega n \quad (3.8)$$

Уравнение (3.8) получено для канала с положительным направлением вращения, для которого $\alpha < 90^\circ$. При угле $\alpha > 90^\circ$ аналогично получено

$$W = W_m \left(1 - \frac{n}{R_A}\right) + 2\omega n \quad (3.9)$$

3.3. Движение частицы во вращающемся криволинейном канале. Эффективная длина канала. Рассматривая плоское движение частиц во вращающихся криволинейных каналах допускали, что система газ-частицы есть "разбавленная", т.е. система, у которой расстояние между частицами значительно больше диаметра самих частиц. Это позволило в первом приближении считать, что профиль скорости газового потока не деформируется и частицы движутся без столкновения друг с другом. Для одиночной сферической частицы использовано общее уравнение динамики точки в обобщенных координатах

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dq_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = F_i \quad (3.10)$$

За обобщенные координаты приняты координаты частицы f и n , а за обобщенные силы - силы аэродинамического сопротивления. Поскольку в каналы ротора попадают мелкие частицы и их относительные скорости малы, режим обтекания частиц подчиняется закону Стокса. Проекция относительной скорости газа на

направление n равна нулю, т.к. ранее принято допущение, что течение газа в канале безвихревое, а проекция на направление f равна величине этой скорости. Уравнение (3.10) записано в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{f}} \right) - \frac{\partial T}{\partial f} = 3\pi \mu d_p (w - \dot{f}) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{n}} \right) - \frac{\partial T}{\partial n} = 3\pi \mu d_p \dot{n} \end{cases} \quad (3.11)$$

Кинетическая энергия частицы определена в абсолютном движении.

После преобразования (3.11) получили систему дифференциальных уравнений, описывающих движение частицы во вращающемся канале для $\alpha < 90^\circ$

$$\begin{cases} \ddot{f} + \dot{f} - Stk^2 \bar{f} = 2Stk \dot{\bar{n}} + 2Stk \bar{n} - Stk \bar{w} - 2Stk^2 \cos \alpha_y \\ \ddot{\bar{n}} - \dot{\bar{n}} - Stk^2 \bar{n} = -2Stk \dot{f} - 2Stk^2 \sin \alpha_y \end{cases} \quad (3.12)$$

где $\bar{f} = \frac{f}{R}$; $\bar{n} = \frac{n}{R}$; $\bar{w} = \frac{W_0}{\omega R}$; $Stk = \frac{\omega d_p^2 \rho_p}{18 \mu}$; $\bar{t} = \frac{t}{t_0}$

Используя начальные условия: $\bar{n} = 0$, $\dot{\bar{n}} = 0$, $\bar{f} = 0$, $\dot{\bar{f}} = Stk \bar{w}$ при $\bar{t} = 0$, система уравнений (3.12) решалась на ЭВМ "Минск-22" при следующих пределах изменения входящих в нее величин: $Stk = 0,3 \cdot 10^{-4} + 1,5$; $\bar{w} = 0,3 + 5$; $\sin \alpha_y = 0 + 0,8$; $\cos \alpha_y = 0,6 + 1,0$. Полученные зависимости $\bar{f} = f_1(\bar{t})$ и $\bar{n} = f_2(\bar{t})$ использованы для расчета длины канала, необходимой для сепарации частиц заданного размера. Частица считалась уловленной, если она достигла стенки канала. Для $\bar{n} = -\bar{t} \cos \alpha_y$ из зависимости $\bar{n} = f_2(\bar{t})$ находилось время \bar{t}^* , а затем из зависимости $\bar{f} = f_1(\bar{t})$ рассчитывалась эффективная длина канала $\bar{f}_{эф}$.

Результаты расчета для $\bar{t} = 0,05 + 0,5$ и наиболее реальных угловых скоростей вращения $10 + 100 \text{ c}^{-1}$ показали, что для $Stk > 0,3$ величина эффективной длины канала отрицательная, т.е. частицы, для которых $Stk > 0,3$ сепарируются до ротора. Это подтверждает достоверность уравнения (3.3) и указывает на то, что во вращающиеся каналы попадают мелкие частицы. Дальнейший расчет $\bar{f}_{эф}$ для $Stk < 0,3$ показал, что при $Stk < 0,05$ мелкие частицы ($d_p < 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) практически не могут быть отсепарированы во вращающихся каналах. Результаты, полученные на основании описанной методики, сопоставлены с экспериментальными данными.

3.4. Экспериментальные исследования эффективности улавливания капельной жидкости. При исследовании эффективности улавливания капельной жидкости роторно - кольцевым сепаратором задача состояла в том, чтобы установить влияние различных параметров на минимальную угловую скорость вращения ротора и связать влияющие факторы общей эмпирической зависимостью. Под минимальной угловой скоростью вращения понималась скорость вращения, при которой практически отсутствовал унос.

Изучение процесса сепарации проводилось при улавливании из воздуха капель диэтиленгликоля (ДЭГа). Исследовалась поочередно каждая ступень ротора. Параметры изменялись в пределах: $W = 0,5 + 10$ м/с; $L_{ж} = 5 \cdot 10^{-6} + 30 \cdot 10^{-6}$ м³/с; $D = 0,927 + 0,492$; $\bar{\epsilon} = 0,072 + 0,182$; $d_{г} = 10 \cdot 10^{-6} + 200 \cdot 10^{-6}$ м; $\omega = 10 + 200$ с⁻¹; $\alpha_{г} = 0 + 40^{\circ}$; $\cos \alpha = -0,6 + 0,6$.

Установлено, что при одинаковом угле установки лопаток эффективность сепарации зависит от направления вращения. За положительное направление вращения принято направление, для которого $\cos \alpha > 0$. Результаты опытов показали, что зависимость эффективности сепарации имеет максимум при отрицательном направлении вращения, т.е. при $\cos \alpha \sim -0,2$ или $\alpha \sim 100^{\circ}$.

В результате обработки опытных данных получено выражение, связывающее минимальную угловую скорость вращения ступени, газо - жидкостные нагрузки и геометрические параметры

$$\omega_{min} = 438,6 W^{1,8} (L_{ж} 10^6)^{0,25} D^{-0,05} \bar{\epsilon}^{1,05} \exp[-2,32 \bar{\epsilon} - 0,022 \cdot 10^3 d_{г} - (104 + 0,023 W) \cos \alpha - 2,2 \cos^2 \alpha], \text{ с}^{-1} \quad (3.13)$$

Отклонение расчетных значений от опытных не превышает 15%.

Уравнение (3.13) учитывает суммарную сепарацию примесей на двух стадиях улавливания роторно - кольцевого сепаратора.

Установлено, что с увеличением числа каналов и их длины эффективность сепарации повышается. Однако из условия технологичности изготовления ротора число каналов, т.е. число лопаток рекомендовано выбирать по соотношению $Z = (100 + 130) D$.

Проведенные исследования позволили установить оптимальную длину каналов, обеспечивающих высокоэффективную сепарацию. При углах установки лопаток $\alpha_{г} = 10 + 20^{\circ}$ длина каналов примерно равна длине лопаток, установленных с перекрытием,

$$L_{opt} = L_{л} = \frac{0,5 D \sin \frac{\alpha}{2}}{\sin(\alpha_{г} + \frac{\alpha}{2})} \quad (3.14)$$

Полупромышленные испытания многоступенчатого роторно - кольцевого центробежного сепаратора по очистке водяного пара от капель раствора сульфата аммония показали высокую эффективность сепарации в широком диапазоне изменения паро - жидкостных нагрузок.

3.5. Экспериментальные исследования эффективности улавливания твердых примесей. Процесс сепарации твердых примесей изучался при улавливании из воздуха частиц $MgCl_2$ различного дисперсного состава. Начальная запыленность воздушного потока составляла $(0,5 + 5) \cdot 10^{-3}$ кг/м³. Исследования показали, что величина минимальной угловой скорости вращения ротора в случае сепарации твердых примесей несколько выше, чем при сепарации капельной жидкости. Установлено, что предварительное орошение запыленного потока резко повышает эффективность улавливания твердых частиц и способствует эффективному отводу отсепарированных примесей. Зависимость минимальной угловой скорости вращения ротора от газо - жидкостных нагрузок и геометрических параметров для очистки запыленного газового потока с предварительным орошением совпала в исследованном диапазоне начальной запыленности с зависимостью (3.13) для случая сепарации чистой жидкости. Отклонение расчетных значений от опытных не превышает 20%.

Проведенный комплекс экспериментальных и теоретических исследований дал возможность разработать методику инженерного расчета роторно - кольцевого центробежного сепаратора и вскрыть некоторые недостатки в его работе. Так сепаратор обладает низкой эффективностью улавливания очень мелких капель. Поэтому предложена более совершенная конструкция роторно - кольцевого сепаратора, во вращающихся каналах которого установлены пакеты сетки, коагулирующие мелкие капли (Решение ВНИИПИЭ от 29.06.79 о выдаче авт.свид. по заявке № 2680580/26).

Высокая эффективность очистки газа от капельной жидкости позволила рекомендовать конструкцию роторно - кольцевого сепаратора в качестве аппарата для обработки газо - нею - жидкостных потоков (авт.свид. № 578330).

4. Практическая реализация результатов исследований

Лабораторией внедрения новой техники Гродненского ПО "Азот" на основании результатов наших исследований разработан технический проект и изготовлен роторно - кольцевой центробежный сепаратор для промышленного испытания. Результаты испытания показали, что сепаратор устойчиво работает в широком диапазоне газо - жидкостных нагрузок, обладает высокой производительностью и эффективностью улавливания жидких примесей, что и позволило рекомендовать его для внедрения в производство.

Роторно - кольцевые центробежные сепараторы (авт. свид. № 521911) внедрены в производстве капролактама Гродненского ПО "Азот" на всех пленочных испарителях, предназначенных для дистилляции капролактама.

Внедрение сепараторов уменьшило в 5 + 6 раз каплеунос, что позволило снизить содержание щелочи в готовом продукте с 0,063 мг-экв/кг до 0,022 мг-экв/кг, снизить показатель оптической плотности с 0,033 до 0,022 и, тем самым, довести товарный капролактама по показателям "щелочность" и "оптическая плотность" до уровня продукта высшей категории качества. Гродненскому капролактаму впервые в стране присвоен Государственный "Знак качества".

Кроме того, внедрение сепараторов позволило увеличить отбор товарного капролактама с 70% до 75%, уменьшив тем самым выход его в виде кубовой жидкости на повторную переработку.

Общий экономический эффект от внедрения роторно - кольцевых центробежных сепараторов на Гродненском ПО "Азот" составил 355 тыс.руб.

В ы в о д и

1. Для очистки низконапорных газовых потоков от механических примесей предпочтение следует отдать сепараторам роторного типа; из разработанных нами на уровне изобретений конструкций наибольшей эффективностью обладает роторно - кольцевой центробежный сепаратор с центральным стоком газа.

2. Полуэмпирические и эмпирические зависимости, полученные для расчета гидродинамики роторно - кольцевого сепаратора и его эффективности, обеспечивают хорошую сходимость с экс -

периментальными результатами при широком варьировании газо-жидкостных нагрузок и конструктивных параметров.

3. Показано теоретически и подтверждено экспериментально осуществление предельных размеров частиц, улавливаемых до ротора, и оптимальной длины каналов, обеспечивающих высокоэффективную сепарацию.

4. Даны рекомендации по проектированию и инженерному расчету промышленного варианта сепаратора.

5. Опытно-промышленные испытания и внедрение роторно-кольцевых центробежных сепараторов (авт. свид. № 521911) на установках дистилляции капролактама Гродненского ЦО "Азот" показали их высокую эффективность работы в широком диапазоне газо-жидкостных нагрузок, позволили улучшить показатели готового продукта и обеспечить его стабильное высокое качество.

Экономический эффект от внедрения составил 355 тыс.руб.

Условные обозначения

Δp_c - гидравлическое сопротивление ступени ротора, Па; Q , $Q_{ж}$ - расход газа и жидкости, м³/с; W , W_m - скорость газа на входе в ступень и среднерасходная скорость газа в канале, м/с; D , D_n , R , r , R_k , h_k - относительный наружный диаметр ступени, диаметр, радиус ступени наружный и радиус внутренний, радиус и высота компенсационной ступени, м; \bar{e} , e_n , e_{opt} , R_n - относительная длина лопатки, длина и оптимальная длина лопатки, радиус кривизны лопатки, м; Z , \bar{Z} - число лопаток, относительное число лопаток; α_y , α , β_{2k} - угол установки лопаток и направления вращения ступени, угол установки лопаток на выходе из компенсационной ступени, град; ω , ω_{min} - угловая и минимальная угловая скорость вращения ступени, с⁻¹; d_y - размер частицы, м; ρ , ρ_y - плотность газа и частицы, кг/м³; μ - динамическая вязкость газа, Па.с; p - давление газа, Па; $W_{отн}$, U_y - относительная и окружная скорость частицы, м/с; s , n , x , y - координаты частицы в относительном и абсолютном движении; T - кинетическая энергия частицы, $T = 0,5 m_y (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)$; F_c - обобщенная сила; f - коэффициент сопротивления; τ , τ_n - время и время релаксации частицы, с; Re_y - критерий Рейнольдса для частицы, $Re_y = W_{отн} d_y \rho / \mu$;

Stk - критерий Стокса, $Stk = \omega d_p^2 \rho_p / 18 \mu$; $\bar{D} = D/D_0$; $\bar{e} = e_n/D_0$; $\bar{x} = \pi/z$; $D_0 = 0,275$ м.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. А.с. 521911 (СССР). Центробежный сепаратор / Плехов И.М., Левданский Э.И., Прудников Ф.В., Сергейчук П.Е., Соловьев Г.И., Иванов В.А. Оpubл. в Б.И., 1976, № 27.

2. Плехов И.М., Прудников Ф.В., Левданский Э.И. Центробежный сепаратор для пленочных испарителей. - Эксплуатация, ремонт и защита от коррозии оборудования в химической промышленности. - М.: НИИГЭХИМ, 1979, вып. I, с. I - 4.

3. А.с. 662124 (СССР). Центробежный сепаратор / Плехов И.М., Прудников Ф.В., Левданский Э.И. Оpubл. в Б.И., 1979, № 18.

4. Центробежный сепаратор / Плехов И.М., Прудников Ф.В., Левданский Э.И., Новосельская Л.В. Решение ВНИИГЭХИМ от 29.06.79 о выдаче а.с. по заявке № 2680580/26.

5. Прудников Ф.В., Плехов И.М. Исследование центробежных роторных сепараторов для очистки газов. - Минск, 1979, 12 с. Рукопись депонирована в ОНИИГЭХИМ г. Черкассы 15 авг. 1979 г., № 3035/79 деп.

6. А.с. 570381 (СССР). Устройство для очистки газа от пыли / Плехов И.М., Прудников Ф.В., Левданский Э.И., Ершов А.И. Оpubл. в Б.И., 1977, № 32.

7. А.с. 550169 (СССР). Устройство для улавливания пыли / Прудников Ф.В., Плехов И.М., Марков В.А., Мануков Ю.Н. Оpubл. в Б.И., 1977, № 10.

8. А.с. 654270 (СССР). Устройство для очистки газа от пыли / Прудников Ф.В., Плехов И.М., Марков В.А., Вайтехович П.Е. Оpubл. в Б.И., 1979, № 12.

9. А.с. 679297 (СССР). Устройство для улавливания пыли / Прудников Ф.В., Плехов И.М., Марков В.А., Вайтехович П.Е. Оpubл. в Б.И., 1979, № 30.

10. А.с. 578330 (СССР). Центробежный пеногаситель / Плехов И.М., Прудников Ф.В., Марков В.А., Вайтехович П.Е. Оpubл. в Б.И., 1977, № 40.

11. Прудников Ф.В., Плехов И.М., Левданский Э.И. Исследование эффективности улавливания капельной жидкости центробежным роторно - кольцевым сепаратором. - Минск, 1979, 14 с. Рукопись деп. в ОНИИГЭХИМ г. Черкассы 26 сент. 1979 г., № 3079/79 деп.

Лух

Федор Владимирович Прудников

Разработка и исследование роторных сепараторов для очистки газов.

Подписано в печать 7.01.80. АТ-06515. Формат 60 x 84/16.

Усл.печ.л. 0,95. Уч. - изд. л. 1,02. Тираж 100 экз.

Заказ 11. . Бесплатно.

Отпечатано на ротапринтере БТИ им. С.М.Кирова.

220630, Минск, ул. Свердлова, 13.